



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VYUŽITÍ KITU MYRIO PRO MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DYNAMICKÝCH SIGNÁLŮ

MEASUREMENT AND SIGNAL PROCESSING WITH MYRIO KIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK HETEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FILIP KŠICA

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Marek Heteš**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Filip Kšica**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití kitu myRio pro měření a zpracování dynamických signálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vývojový kit myRio od National Instruments je multifunkční platforma využitelná pro široké spektrum inženýrských problémů. V propojení s LabView nabízí značné možnosti na poli měření a zpracování signálů. Cílem této práce bude seznámit se s možnostmi tohoto zařízení a využít ji jako platformu pro zpracování signálů z měření dynamických soustav.

Cíle bakalářské práce:

1. Prozkoumání možností vývojového kitu myRio pro záznam a zpracování signálů z měření dynamických soustav.
2. Tvorba aplikace v prostředí LabView umožňující záznam a zpracování měřených signálů a jejich ukládání na externí médium.
3. Praktická demonstrace funkčnosti aplikace.

Seznam doporučené literatury:

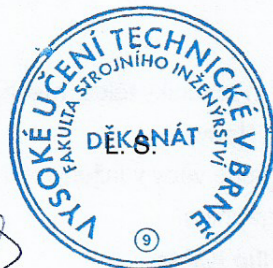
HATCH, Michael R., 2001. Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS. ISBN 1584882050.

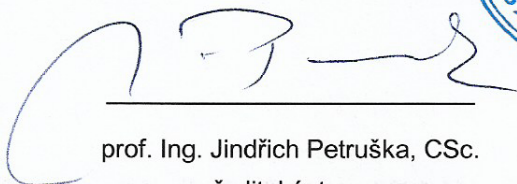
PIERSOL, Allan G. a Thomas L. PAEZ, 2010. Harris' Shock and Vibration Handbook. 6. B.m.: McGraw Hill. ISBN 9780071633437.

REAL, Tiempo, L CUZCO, J ARIAS, A ABRIL a D CABRERA, 2015. Acquisition, Filtering and Decomposition into Real-Time ECG Signal with Ni - MyRio. 2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). B.m.: IEEE, 209–213.

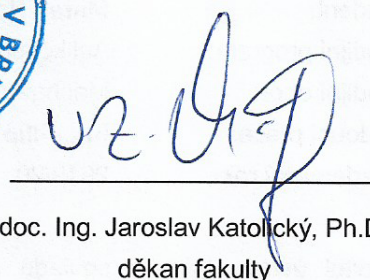
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20.

V Brně, dne 23. 10. 2019





prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá preskúmaním možností kitu myRIO a prostredia LabVIEW na záznam a spracovanie signálov z merania dynamických sústav a návrhom aplikácie v prostredí LabVIEW ktorá nám toto umožňuje. Koniec práce sa venuje testovaniu aplikácie a praktickej demonštrácii jej možností.

Summary

This thesis deals with research of options for data acquisition and signal analysis, of the myRIO kit and LabVIEW platform. Next it describes the design of application for data acquisition and signal analysis, and the last chapter of this thesis is about testing and a practical demonstration of our application.

Klíčová slova

myRIO kit, LabVIEW, Záznam signálov, Analýza signálov, Vibrodiagnostika

Keywords

myRIO kit, LabVIEW, Data acquisition, Signal analysis, Vibration diagnostics

HETEŠ, M. *Využití kitu myRio pro měření a zpracování dynamických signálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. 39 s. Vedoucí Ing. Filip Kšica.

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Využití kitu MYRIO pro měření a zpracování dynamických signálů“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Marek Heteš

Ďakujem týmto Ing. Filipovi Kšicovi za cenné pripomienky a rady pri vypracovaní bakalárskej práce.

Marek Heteš

Obsah

1	Úvod	3
2	Ciele práce	4
3	myRIO a platforma LabVIEW	5
3.1	Vývojový kit NI myRIO	5
3.1.1	I/O porty	5
3.1.2	AD prevodník	7
3.1.3	Zabudované periférie kitu myRIO	9
3.2	Platforma LabVIEW	9
3.2.1	myRIO knižnica	10
3.2.2	Knižnica dátovej komunikácie	11
3.2.3	Spracovanie a analýza signálov	11
4	Vibrodiagnostika	12
4.1	Charakteristické parametre vibrácií	12
4.2	Graf signálu v časovej doméne	13
4.3	Graf signálu vo frekvenčnej doméne	13
4.3.1	Zistenie príčiny nadmerných vibrácií pomocou FFT	14
4.3.2	DFT a FFT	15
5	Návrh aplikácie	17
5.1	Aplikácia na záznam a ukladanie signálov	17
5.1.1	Fungovanie aplikácie	17
5.1.2	Vlastnosti aplikácie	18
5.2	Aplikácia na analýzu zaznamenaných dát	19
5.2.1	Záznamové typy	19
5.2.2	Funkcie na analýzu	20
5.2.3	Analýza trendov	22
5.3	Aplikácia na real-time analýzu signálu	23
5.3.1	Záznam signálu a jeho zobrazenie	23
5.3.2	Spracovanie a ukladanie dát	24
5.3.3	Alarmy	25
6	Praktická demonstrace	27
6.1	Záznam a analýza sínusových signálov	27
6.1.1	Kombinácia 3 sínusových signálov	27
6.1.2	Štvorcový signál pomocou kombinácie sínusových signálov	28
6.1.3	Aliasing	29
6.2	Tvorba spektrogramu z dynamického signálu	30
6.2.1	Chirp a DTMF tóny	30
6.2.2	Spektrogram samohlások	32
7	Záver	34

OBSAH

Literatúra	34
Zoznam obrázkov	37
Zoznam použitých skratiek a symbolov	38

1. Úvod

Mechanické stroje pri chode vydávajú rôzne vibrácie. Tieto vibračné signály dokážeme vhodným systémom na zber dát zaznamenávať a následná analýza získaných dát nám môže poskytnúť komplexný prehľad o stave meraného zariadenia. Dlhodobým ukladaním charakteristických parametrov tohto signálu, ako napríklad rms hodnota alebo crest factor¹, si dokážeme včas všimnúť začínajúcu poruchu a predísť poškodeniu zariadenia.

Senzory zrýchlenia, ako napríklad piezo-elektrický senzor, vytvárajú elektrické analógové (spojité) signály, ktoré sú úmerné zrýchleniu. Počítače však nedokážu pracovať s analógovými signálmi, preto sa musia tieto signály previesť na diskkrétne (nespojité). K digitalizácii spojitého signálu sa využíva AD². Ten zo spojitého signálu vytvorí množinu diskrétnych bodov, s ktorou už počítače dokážu pracovať.

MyRIO v kombinácii s prostredím LabVIEW od National Instruments tvoria dobrú platformu na vývoj systému pre záznam a analýzu signálov z meraní dynamických sústav. Kit myRIO disponuje AD prevodníkom s vysokou vzorkovacou frekvenciou a kvalitným hardvérom ktorý nám umožní spracovať a ukladať veľké množstvo dát.

V nasledujúcich kapitolách sa budeme zaoberať preskúmaním možností vývojového kitu myRIO a platformy LabVIEW na zber a analýzu dát, tvorbou aplikácie v prostredí LabVIEW na záznam a spracovanie meraných signálov a následnou demonštráciou funkčnosti tejto aplikácie.

¹Pomer vrcholovej a efektívnej hodnoty signálu

²Analog to digital

2. Ciele práce

Začiatok tejto práce sa bude venovať preskúmaniu možností, ktoré nám ponúka myRIO kit a softvér LabVIEW, a rešerši jednotlivých technológií, ako napr. AD prevodník a Rýchla Fourierova transformácia, ktoré budeme využívať pri návrhu nášho systému na záznam a spracovanie signálov. Systém sa bude skladať z 3 častí.

Cielom prvej časti bude vytvoriť aplikáciu pre kit myRIO, ktorá nám umožní záznam a ukladanie signálov na externé úložisko. Aplikácia bude vyvíjaná v prostredí LabVIEW a bude využívať vstavaný mikroprocesor a FPGA, analógové vstupy, AD prevodník a digitálne vstupy ktoré budú potrebné k ovládaniu aplikácie (START/STOP a pod.). Pri jej vývoji budeme využívať poznatky ako je fungovanie AD prevodníka a Niquistov-Shannonov teorém, z predošlých kapitol.

Cieľ druhej časti bude vytvorenie aplikácie pre analýzu a spracovanie zaznamenaných signálov. Vývoj bude prebiehať v prostredí LabVIEW, ktoré obsahuje množstvo funkcií, dobre využiteľných pri analýze a spracovaní diskretných signálov. Aplikácia nám umožní prezrieť si signál v časovej doméne aj frekvenčnej doméne (pomocou FFT), robiť merania charakteristických parametrov signálu, ako max/min hodnota, RMS hodnota a pod.

Cieľ poslednej časti bude vytvorenie aplikácie ktorá nám umožní záznam a analýzu signálov „naživo“ (bez nutnosti ukladania na externé úložisko). Taktiež tu bude možnosť dlhodobého ukladania charakteristických parametrov pre spätnú analýzu ich vývoja.

Nakoniec bude vykonaná demonštrácia funkčnosti aplikácie a jej testovanie. Testovanie bude pozostávať z merania rôznych druhov referenčných signálov a z porovnania odmeraných a generovaných signálov. Referenčné signály budú generované pomocou počítačovej zvukovej karty.

3. myRIO a platforma LabVIEW

3.1. Vývojový kit NI myRIO

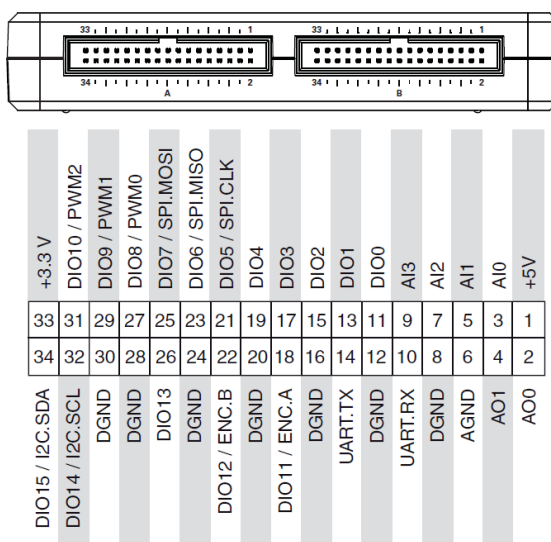
Vývojový kit myRIO od National Instruments (obr. 3.1) je prenosné multifunkčné zariadenie, na ktorom je možné vyvíjať široké spektrum aplikácií, využívajúcich zabudované FPGA (Field-programmable gate array), mikroprocesor a rôzne periférie.



Obr. 3.1: myRIO [29]

3.1.1. I/O porty

MyRIO obsahuje veľké množstvo výstupných/výstupných pinov rozdelených do 2 totožných MXP konektorov (obr. 3.2) a jedného MSP konektora. Poskytuje digitálne vstupy/výstupy, analógové vstupy/výstupy, audio a zdroje napätia (3,3V, 5V, $\pm 15V$). Digitálne linky ob-



Obr. 3.2: MXP konektor [30]

sahujú aj sekundárne funkcie, ako napr. PWM modulátor, vstupy pre enkóder alebo I²C a SPI zbernice. Tieto zbernice môžu byť použité na rozšírenie možností myRIO. Pomo-

3.1. VÝVOJOVÝ KIT NI MYRIO

cou nich môžeme k myRIO pripojiť LCD displej, externé AD/DA prevodníky alebo ďalšie univerzálne vstupy/výstupy.

Analógové porty

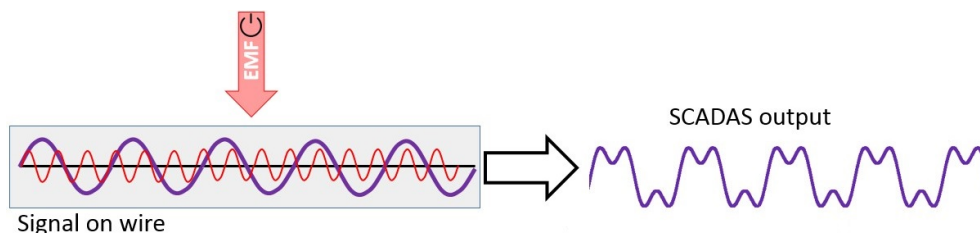
MyRIO má 6 analógových výstupov a 10 analógových vstupov.

Analógové výstupy na MXP konektore dokážu generovať 0 až 5V signály a výstupy na MSP konektore dokážu generovať $\pm 10V$ signály. Každý výstup má svoj DA prevodník s 12 bit rozlíšením a maximálnou aktualizácnou rýchlosťou 345 kS/s¹.

Na MXP konektore myRIA sa ďalej nachádza 8 single-ended vstupov, ktoré dokážu zmerať 0 až 5 V signály s absolútnou presnosťou ± 50 mV. MSP obsahuje 2 diferenciálne vstupy ktoré dokážu zmerať ± 10 V signály s absolútnou presnosťou ± 200 mV. Všetky analógové vstupy sú multiplexované do jediného AD prevodníka s 12 bit rozlíšením a maximálnou vzorkovaciu rýchlosťou 500 kS/s. Taktiež majú ± 16 V prepäťovú ochranu.

Single-ended vs. Diferenciálny analógový vstup

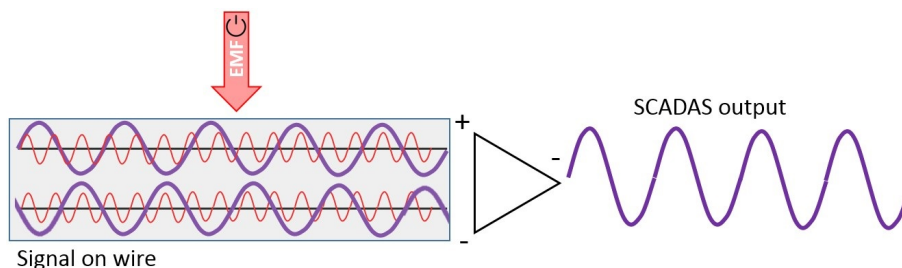
Single-ended analógový vstup meria napätie medzi vstupom a zemou. Nevýhodou tejto konfigurácie je, že je viac náchylná na elektromagnetické rušenie. Na ľavej strane obrázku 3.3 môžeme vidieť meraný signál fialovou farbou a elektro-magnetické rušenie červenou farbou. Výsledný signál bude spojením tohto signálu a rušenia.



Obr. 3.3: Záznam signálu s rušením single-ended konfiguráciou [1]

Diferenciálny analógový vstup meria rozdiel napätia medzi dvoma samostatnými vstupmi (AI+ a AI-). Nevýhodou tejto konfigurácie je, že potrebuje 2 krát viac vstupov oproti single-ended metóde, ale je odolnejšia voči elektromagnetickému rušeniu.

Odolnosť voči rušeniu spočíva v tom, že ak bude rušenie totožné na oboch dvoch vstupoch, tak vo výsledku bude toto rušenie ignorované. Použitím krútenej dvojlinky môžeme docieľať aby rušenie na oboch drôtoch bolo rovnaké.



Obr. 3.4: Záznam signálu s rušením diferenciálnou konfiguráciou [1]

¹Tisíc vzoriek za sekundu

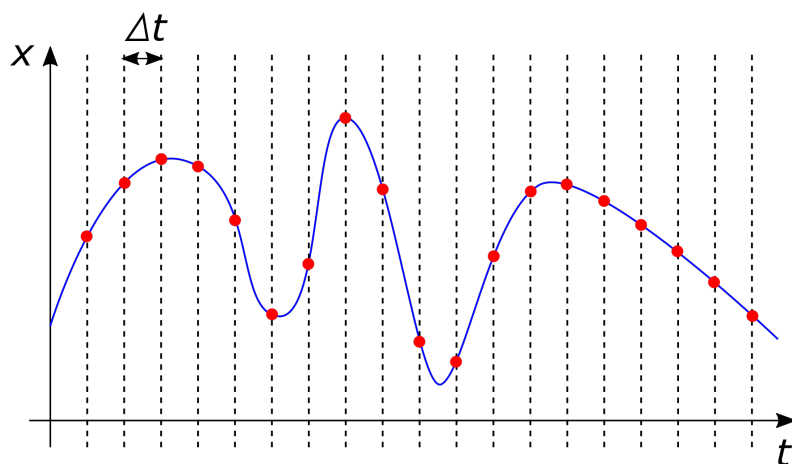
Na obrázku 3.4 vidíme 2 analógové vstupy. Fialová krivka je meraný signál a červené krivky sú elektromagnetické rušenie. Keďže na oboch vstupoch je rovnaké rušenie, vo výsledku sa neprejaví. [1, 2]

3.1.2. AD prevodník

AD prevodník (analog-to-digital) je zariadenie ktoré dokáže konvertovať spojitý analógový signál na signál diskretný. Tento prevod je vykonaný v dvoch hlavných krokoch, vzorkovanie a kvantovanie.

Vzorkovanie

Je proces, pri ktorom vodorovnú osu (čas) spojitého signálu nasekám na rovnomerné úseky Δt . Z každého úseku sa potom zoberie jedna vzorka. Δt závisí na vzorkovacej rýchlosti, tzv. „sampling rate“.



Obr. 3.5: Vzorkovanie spojitého signálu

Ako môžeme vidieť z obr. 3.5 pri tomto procese stratíme veľa detailov, pretože z pôvodného spojitého signálu (modrá čiara) dostaneme množinu diskretných bodov (červené body). Z toho nám vyplýva, že správna rekonštrukcia spojitého signálu je závislá na zvolení vhodnej vzorkovacej frekvencie. O tomto probléme nám hovorí Niquistov-Shannonov teorém. [3, 4]

Nyquistov-Shannonov teorém

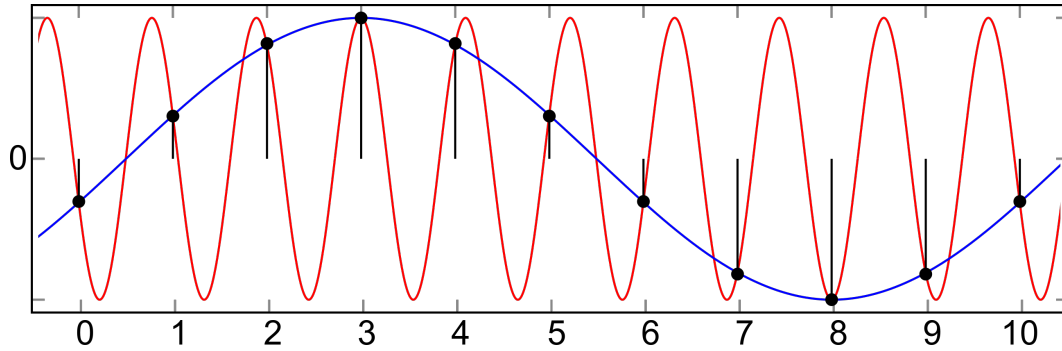
Tento teorém hovorí, že spojitý signál ktorý neobsahuje frekvencie vyššie ako f hertz, dokážeme presne zrekonštruovať vzorkami, ktoré sú od seba rovnomerne vzdialené $1/2f$. Čo znamená, že vzorkovacia frekvencia f_s musí byť 2 krát vyššia ako maximálna frekvencia meraného signálu f_{max} (vzťah 3.1). Ak toto kritérium nieje splnené vzniká nám *aliasing efekt*. [5, 6]

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (3.1)$$

3.1. VÝVOJOVÝ KIT NI MYRIO

Aliasing efekt

Tento efekt vzniká nesplnením Nyquistovho kritéria, teda ak maximálna frekvencia signálu f_{max} je vyššia ako polovica vzorkovacej frekvencie f_s . V tom prípade sa frekvencie vyššie ako $f_s/2$ budú po rekonštrukcii javiť ako nižšie. Frekvencia $f_s/2$ sa nazýva *Nyquistova frekvencia*.



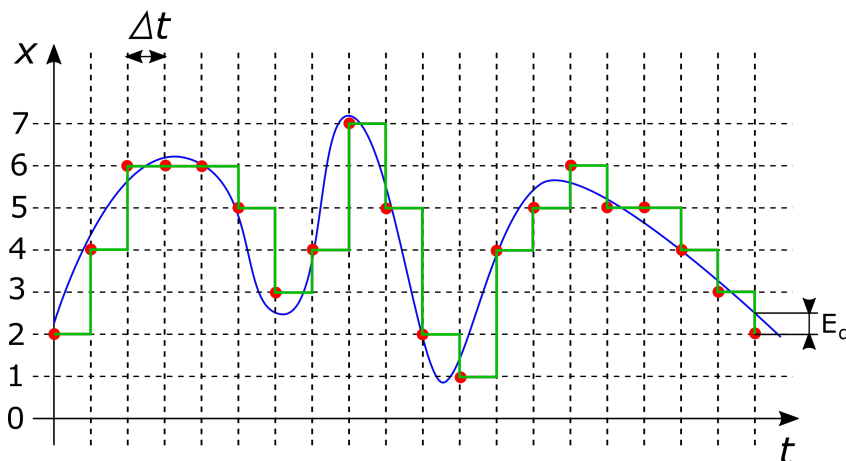
Obr. 3.6: Dva rozdielne signály ktoré popisuje rovnaká množina vzorkov [31]

Na obrázku 3.6 môžeme vidieť červenou čiarou signál, ktorého frekvencia je vyššia ako $f_s/2$, a modrou čiarou rekonštruovaný signál s nižšou frekvenciou ako bola pôvodná.

Tento problém dokážeme vyriešiť filtrovaním frekvencií vyšších ako $f_s/2$ z analógového signálu, vhodným dolnopriepustným filtrom. [7, 8]

Kvantovanie

Počítače dokážu vyjadriť čísla iba s určitou presnosťou. Preto pri kvantovaní je zvislá os signálu (napäťový rozsah) rozdelená na úrovne, ktoré môže digitalizovaný signál nadobudnúť. Množstvo úrovní udáva rozlíšenie prevodníka.



Obr. 3.7: Kvantovanie signálu

Na obrázku 3.7 je použitý prevodník s 3-bit rozlíšením, preto je zvislá os rozdelená do 8 úrovní. Vzorka reálneho signálu (modrá čiara) sa teda zaokrúhli na najbližšiu úroveň. Zrekonštruovaný analógový signál, po vzorkovaní a kvantizovaní, je zelenou farbou.

Týmto vzniká kvantizačná chyba E_q , ktorú môžeme vylepšiť použitím AD prevodníka s vyšším rozlíšením.

3.1.3. Zabudované periférie kitu myRIO

Kit myRIO obsahuje veľké množstvo zabudovaných periférií, ktoré robia z myRIO výhodné zariadenie na vývoj aplikácií. V nasledujúcej kapitole spomenieme hlavné periférie, ktoré budeme využívať v našej aplikácii.

Ukladanie dát

Na myRIO sa nachádza systémová flash pamäť o veľkosti 512 MB, z toho je voľnej približne 260 MB, do ktorej môžeme nahráť naše programy, alebo môžeme na ňu ukladať namerané dáta. Ak potrebujeme pamäť viac, môžeme využiť zabudovaný USB 2.0 port a externé úložisko naformátované na systém FAT32.

Wi-Fi modul

MyRIO disponuje vstavaným Wi-Fi modulom, ktorý môžeme využiť na bezdrôtové nahrávanie programov, ovládanie alebo získavanie dát. V spojení s LabVIEW knižnicou dátových komunikácií, ktorá obsahuje množstvo protokolov, je možné vytvoriť program ktorý bude napr. automaticky zálohovať dáta na sieťové úložisko (kap. 3.2.2).

Akcelerometer

Taktiež je tu zabudovaný akcelerometer, ktorý dokáže merať zrýchlenie v 3 osiach. Jeho maximálne preťaženie je ± 8 g a vzorkovacia rýchlosť 800 S/s.

3.2. Platforma LabVIEW

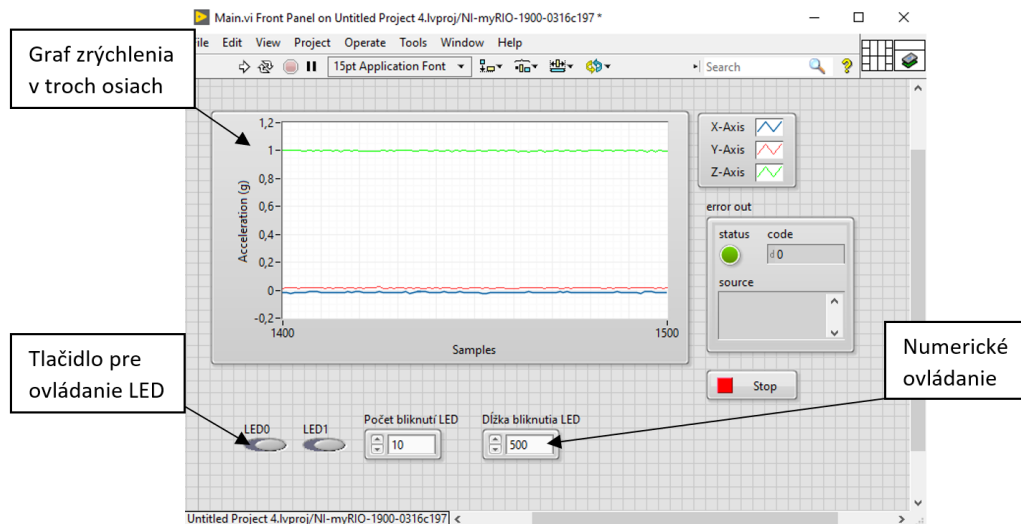
LabVIEW je grafický programovací jazyk, ktorý využíva ikony namiesto riadkov kódu na vytvorenie programu. Grafické programovanie ale neznamena, že sa v LabVIEW nedajú vytvoriť komplexné programy, pretože obsahuje veľké množstvo knižníc, nízko úrovňových aj vysoko úrovňových funkcií, ktoré môžu byť využité v širokej škále aplikácií. V spojení so vstavaným pomocníkom a veľkou internetovou komunitou, ho môžu jednoducho využívať aj nováčikovia.

LabVIEW programy/podprogramy sa nazývajú *virtual instruments* (VI). Každé VI sa skladá z front panelu a block diagramu.

Front panel

Na front panel môžu byť umiestnené rôzne ovládacie prvky a ukazovatele, ktorými môžeme program ovládať, alebo vizualizovať spracované dáta (obr. 3.8). Ovládacie prvky môžu byť rôzne gombíky, tlačítka, číselníky. Ukazovatele zas rôzne grafy, virtuálne LED indikátory, numerické indikátory a ďalšie.

3.2. PLATFORMA LABVIEW

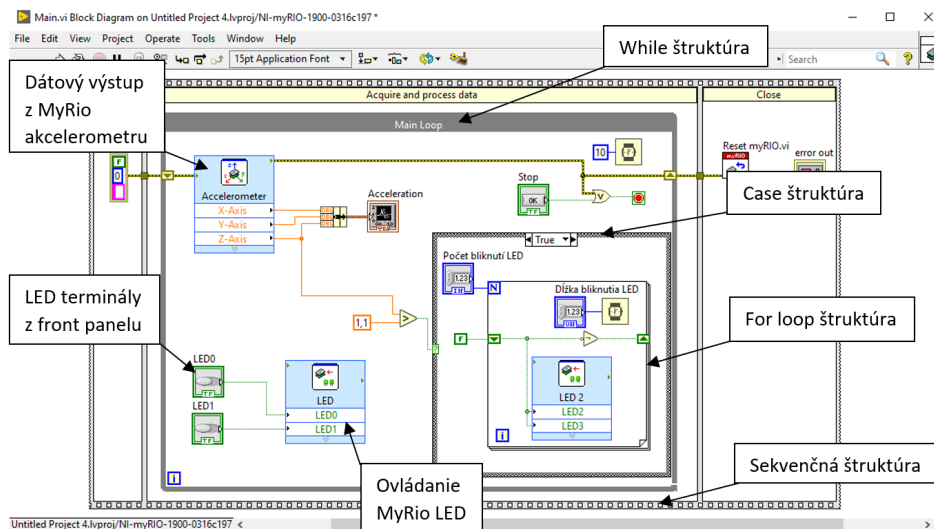


Obr. 3.8: Ukážka front panelu s ovládacími a vizualizačnými prvkami

Block diagram

Block diagram je jadrom aplikácie. Pridávajú sa sem rôzne funkcie a štruktúry (obr. 3.9). Objekty z front panela sú to znázornené ako terminály.

Štruktúry ktoré sa tu môžu vyskytnúť sú napr. while loop, for loop, case štruktúra, sekvenčná štruktúra. Predpripravené funkcie ktoré tu môžeme využiť sú napr. funkcie na prácu s maticami, numerické a boolové funkcie, funkcie na tvorbu a ukladanie súborov, ale aj špecializovanejšie funkcie ako analýza a spracovanie signálov, dátová komunikácia a funkcie pre ovládanie kitu myRIO.



Obr. 3.9: Ukážka block diagramu

3.2.1. myRIO knižnica

LabVIEW s myRIO toolkitom obsahuje knižnicu funkcií ktoré sú špeciálne vytvorené pre myRIO. Tieto funkcie dokážu pracovať s analógovými a digitálnymi vstupmi/výstupmi a ich vedľajšími funkciami (PWM, I²C, UART), so vstavanými LED, tlačidlom alebo

akcelerometrom. Sú tu vysoko-úrovňové funkcie, ktoré sú už pripravené a budú s myRIOm vždy fungovať. Ak máme ale špeciálne požiadavky, nachádzajú sa tu aj nízko-úrovňové funkcie, pomocou ktorých si môžeme program prispôbiť podľa našich potrieb.

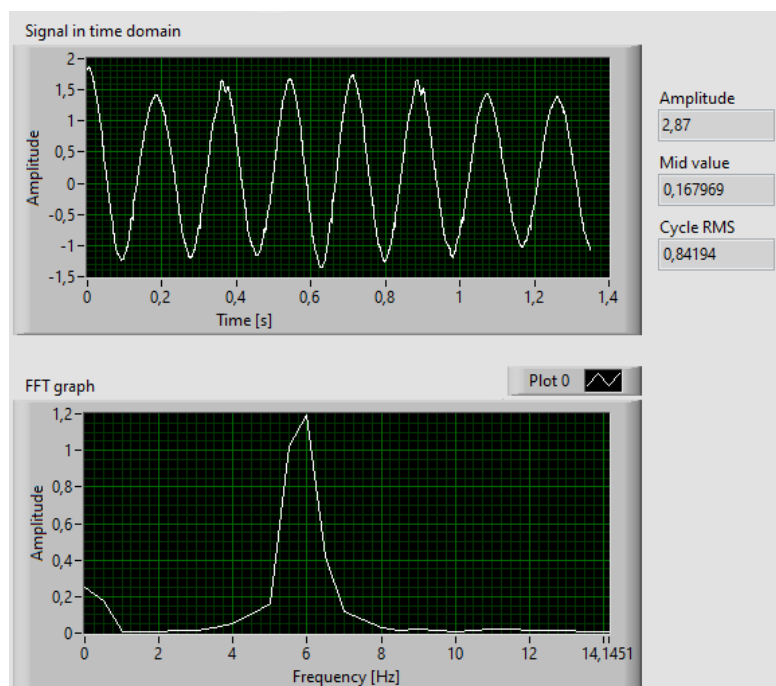
3.2.2. Knižnica dátovej komunikácie

Táto knižnica slúži na zdieľanie dát. Ďelí sa na funkcie lokálne (v jednej VI), globálne (v celej aplikácii) a viac-platformové (PC, myRIO, cRIO, FPGA, atď.). Je tu množstvo funkcií sieťových protokolov, ako napr. TCP, UDP, FTP, WebDAV, ktoré sú jednoduché na používanie.

Keďže myRIO má vstavaný wi-fi modul, môžeme túto knižnicu využiť napr. na bezdrôtovú komunikáciu medzi myRIO a PC, alebo automatické odosielanie spracovaných dát na server.

3.2.3. Spracovanie a analýza signálov

Okrem funkcií, ktorými môžeme signály ukladať a vizualizovať, nám LabVIEW ponúka aj funkcie na analýzu signálov. Sú tu funkcie na meranie priemernej a RMS hodnoty signálu, meranie periódy opakujúceho sa signálu, amplitúdy, max/min hodnoty alebo výpočet FFT (obr. 3.10). Nachádzajú sa tu aj digitálne filtre, ktorými sa dajú signály upravovať.



Obr. 3.10: Signál v časovej doméne, jeho FFT a charakteristické parametre

4. Vibrodiagnostika

Je jednou z najefektívnejších metód pri kontrolovaní zdravia mechanických strojov, pretože väčšina strojov pri chode vydávajú vibrácie. Pravidelné kontrolovanie týchto vibrácií nám dokáže napovedať, či stroj pracuje optimálne alebo sa blíži k poruche. Veličiny ktoré pri vibrodiagnostike meriame sú zrýchlenie, rýchlosť a posun. Najčastejšie sa používajú senzory na meranie zrýchlenia (napr. piezo-elektrický senzor) a ostatné veličiny sú dopyčítané softvérom. Zo senzorov získame vibračný signál, ktorého analýzou v časovej alebo frekvenčnej doméne vieme zistiť ktoré časti stroja môžu byť poškodené.

4.1. Charakteristické parametre vibrácií

Zo zaznamenaného vibračného signálu môžeme zmerať charakteristické parametre, ako je napr. maximum a minimum, peak-to-peak amplitúda¹, RMS hodnota alebo crest faktor. Ukladaním týchto hodnôt, môžeme sledovať ich vývoj a vieme sa včas pripraviť na opravu stroja.

Na základe frekvenčného rozsahu týchto signálov, rozdeľujeme vibrácie na nízko frekvenčné a vysoko frekvenčné.

Nízko frekvenčné vibrácie

Tieto vibrácie meriame v rozsahu 10 až 1000 Hz. Kontrola parametrov pri tomto rozsahu nám môže ukázať problémy ako je nevyváženosť stroja alebo povolenie jeho častí. Prípustné hranice rýchlosti alebo zrýchlenia nám určujú normy, napr. ISO 10816-3.

Vysoko frekvenčné vibrácie

Ložiská a prevodovky, kvôli ich konštrukcii, vydávajú vysoko frekvenčné vibrácie. Tieto vibrácie sú merané v rozsahu 500 až 16000 Hz. Pretože existuje veľa typov ložísk a prevodoviek, neexistujú univerzálne limity vibrácií. [9, 10]

Crest faktor

Crest faktor je pomer maximálnej hodnoty signálu x_{max} a RMS hodnoty signálu x_{RMS} (vzťah 4.1).

$$C = |x_{max}|/x_{RMS} \quad (4.1)$$

Crest faktor sinusoidy je $C = 1,414$. Typický vibračný signál stroja s veľkou nevyváženosťou bude mať crest faktor podobný tejto hodnote. Ak sa ale poškodí ložisko, tak crest faktor môže rapídne narásť. Tento faktor je citlivý na vysoké a ostré vrcholy v signáli, pretože tieto zvýšia maximálnu hodnotu x_{max} ale RMS hodnota zostane približne rovnaká. [11]

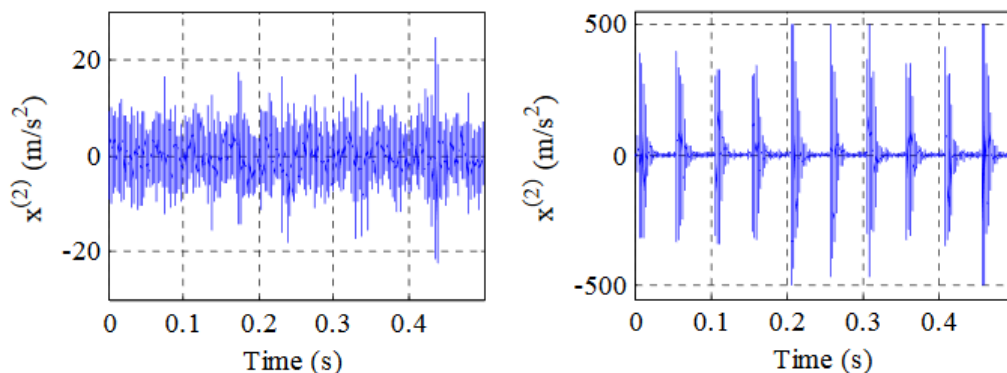
RMS hodnotu získame, odmocnením priemeru z kvadrátov okamžitých hodnôt signálu, podľa vzťahu 4.2. [11]

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (4.2)$$

¹Vzdialenosť medzi najvyšším a najnižším bodom signálu

4.2. Graf signálu v časovej doméne

Tento graf nám ukáže ako sa signál zo senzora vyvíjal časom. Analýza signálu v časovej doméne nám nedokáže dať komplexný prehľad o stave stroja, ale niekedy nám môže pomôcť odhaliť problémy, ktoré by ostali nepovšimnuté napr. analýzou vo frekvenčnej doméne.

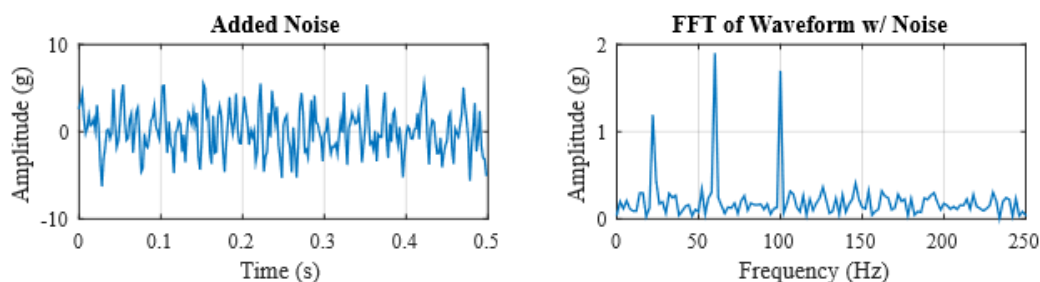


Obr. 4.1: Vibrácie zdravého ložiska (vľavo) a poškodeného ložiska (vpravo) [12]

Vibračný signál ložiska s poškodeným vonkajším krúžkom bude mať v grafe, oproti zdravému ložisku, vysoké a ostré vrcholy ktoré budú mať medzi sebou konštantnú vzdialenosť (obr. 4.1). Tieto vrcholy vznikajú pri každom prejení valivého elementu po poškodení. [12]

4.3. Graf signálu vo frekvenčnej doméne

Analýza vibrácií v časovej doméne stroja, ktorý je zložený z väčšieho množstva individuálnych častí nieje jednoduchá. Každá časť vydáva signál o inej frekvencii a amplitúde a výsledný signál bude spojením týchto častí. Preto bude detekcia problému obtiažnejšia.



Obr. 4.2: Signál v časovej doméne (vľavo) a signál vo frekvenčnej doméne (vpravo) [13]

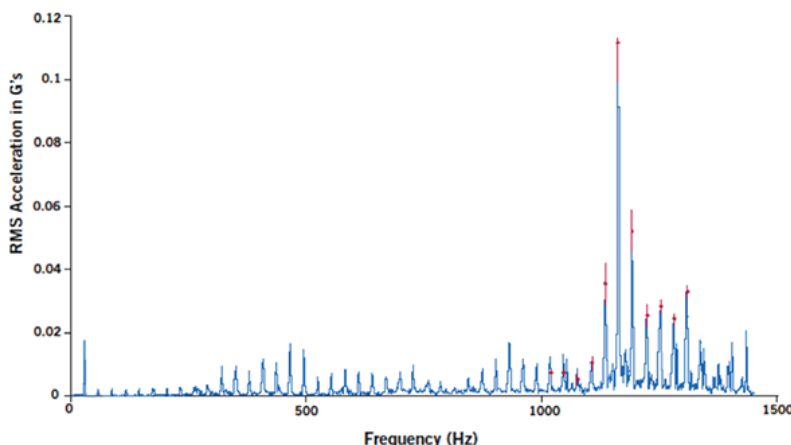
Riešením je analýza signálu vo frekvenčnej doméne. Transformácia signálu z časovej domény do frekvenčnej je vykonaná *Fourierovou transformáciou*. Výsledná amplitúda (zrýchlenia/rýchlosti) potom nieje závislá na čase, ale na frekvencii. Signál na obr. 4.2 vľavo sa skladá z 3 frekvenčných komponentov 22 Hz, 60 Hz, 100 Hz a tieto frekvencie majú amplitúdy 1 g, 2 g a 1,5 g. Ako sa môžeme presvedčiť, nedokážeme z tohoto signálu jednotlivé zložky rozlíšiť. Fourierovou transformáciou tohto signálu môžeme vidieť 3 vrcholy v už spomínaných frekvenciách (vpravo).

4.3. GRAF SIGNÁLU VO FREKVENČNEJ DOMÉNE

Keďže táto analýza prebieha na digitálnych počítačoch, ktoré pracujú s diskretnými bodmi a nie so spojitým signálom, využívame k transformácii *Diskrétnu Fourierovu transformáciu* (DFT) alebo *Rýchlu Fourierovu transformáciu* (FFT). FFT je algoritmus využívaný k rýchlejšiemu výpočtu DFT (na fungovanie DFT a FFT sa bližšie pozrieme v kap. 4.3.2). [13]

4.3.1. Zistenie príčiny nadmerných vibrácií pomocou FFT

FFT analýzou vibrácií dokážeme zistiť či sa na stroji nachádza porucha, a vie nám aj napovedať aký problém spôsobuje tieto nadmerné vibrácie.



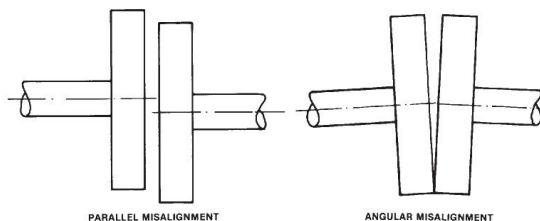
Obr. 4.3: Ukážkový príklad zlomeného zubu keď 2 ozubené kolesá zapadajú do seba [32]

Nevyváženosť

Nevyváženosť rotačných prvkov vzniká, keď sa ťažisko nenachádza v osi rotácie, čo pri chode stroja spôsobuje nadmerné vibrácie v radiálnej rovine a rýchlejšie opotrebenie ložísk. Nevyváženosť sa nám v FFT prejaví ako veľmi vysoká amplitúda vo frekvencii ktorá je totožná s pracovnou rýchlosťou stroja (1x pracovnej rýchlosti). Vibračný signál nevyváženého stroja väčšinou neobsahuje ďalšie harmonické frekvencie (2x, 3x atď. pracovnej rýchlosti). [10, 14, 15]

Vychýlenie

Vychýlenie môže byť uhlové alebo paralelné (obr. 4.4) každé sa v FFT prejaví trochu odlišným spôsobom.



Obr. 4.4: Paralelné (vľavo) a uhlové (vpravo) vychýlenie [33]

Paralelné vychýlenie rotačných častí stroja bude spôsobovať nadmerné vibrácie v radiálnej rovine, a v FFT uvidíme vysokú amplitúdu vo frekvencii, ktorá korešponduje s 2x

pracovnej rýchlosti. Ak sa bude v stroji vyskytovať uhlové vychýlenie, budú vznikať nadmerné vibrácie v axiálnom smere a v FFT budeme pozorovať nadmerne vysokú amplitúdu vo frekvencii 1x pracovnej rýchlosti.

Pretože jedny vibrácie vznikajú v radiálnej rovine a druhé v axiálnej, je potrebné vykonať meranie vo viacerých osách. [10, 16, 17]

Povolenie častí stroja

Pri povolení strojových častí alebo uchytenia budú na stroji vznikať silné vibrácie v radiálnej rovine a v smere, kde je stroj „najslabší“. Pri tomto probléme budeme v FFT vidieť vysokú amplitúdu vo frekvencii 1x pracovnej rýchlosti. Taktiež môžu vzniknúť vysoké amplitúdy aj v ďalších harmonických frekvenciách (2x, 3x atď.). [10, 18]

4.3.2. DFT a FFT

Diskrétna Fourierova transformácia (DFT) dokáže nájsť periodicity vo vstupných dátach a silu týchto periodických komponentov. DFT konvertuje N diskretných bodov x_n , od seba rovnomerne vzdialených o Δt , z časovej domény, na N diskretných bodov X_k , od seba rovnomerne vzdialených o Δf , frekvenčnej domény na základe vzťahu 4.3.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (4.3)$$

Platí $0 \leq k \leq N - 1$. Frekvenčné riadkovanie Δf sa rovná vzorkovacej frekvencii AD prevodníka f_s podelennej množstvom vzoriek N (vzťah 4.4).

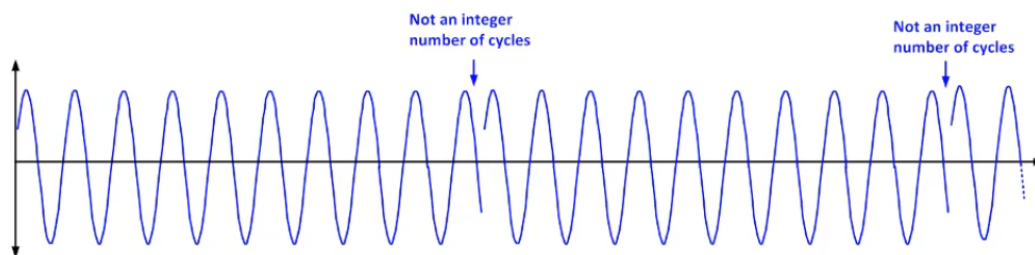
$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (4.4)$$

Rýchla Fourierova transformácia (FFT) je efektívnejší DFT algoritmus. Redukuje množstvo výpočtov potrebných pre N vzoriek z $2N^2$ na $2N \log_2(N)$. Napríklad pre $N = 1024$ vzoriek bude namiesto $2 \cdot N^2 = 2097152$ výpočtov potrebných iba $2 \cdot N \log_2(N) = 20480$ výpočtov. [8, 19, 20]

Leakage

FFT je vykonávané z konečného počtu vzoriek signálu. FFT transformácia však predpokladá, že tento konečný set vzoriek je jedna perióda z periodického signálu (opakuje sa do nekonečna). Ak set vzoriek neobsahuje celočíselné násobky periódy, tak konce signálu budú nespojité (obr. 4.5), čo spôsobí, že v FFT sa objavia vysokofrekvenčné komponenty ktoré sa v reálnom signáli nenachádzajú. Tento fenomén sa nazýva *Leakage* a môžeme ho minimalizovať aplikáciou okna (windowing). [21, 22]

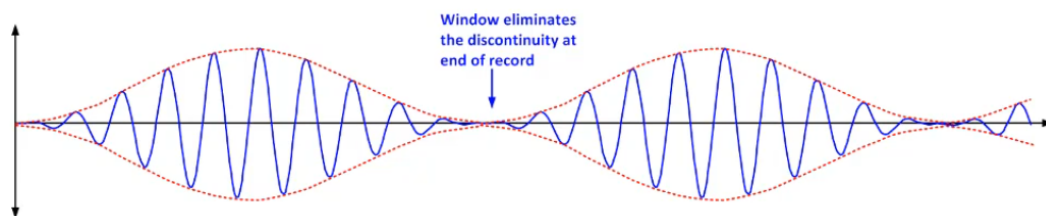
4.3. GRAF SIGNÁLU VO FREKVENČNEJ DOMÉNE



Obr. 4.5: Nespojitosť zaznamenaného signálu pri FFT analýze [34]

Windowing

Tento proces odstráni nespojitosť na koncoch signálu (obr. 4.5). Funguje tak, že zaznamenaný signál sa vynásobí window funkciou, ktorá má konečnú dĺžku a postupne sa pri koncoch blíži k nule (obr. 4.6).



Obr. 4.6: Aplikácia okna na predošlú funkciu [34]

Existuje viac windowing funkcií a každá je určená na iný typ analýzy. Najpoužívanjšia je funkcia Hanning, pretože má mierny vplyv na frekvenčné rozlíšenie a presnosť amplitúdy. [21, 22]

5. Návrh aplikácie

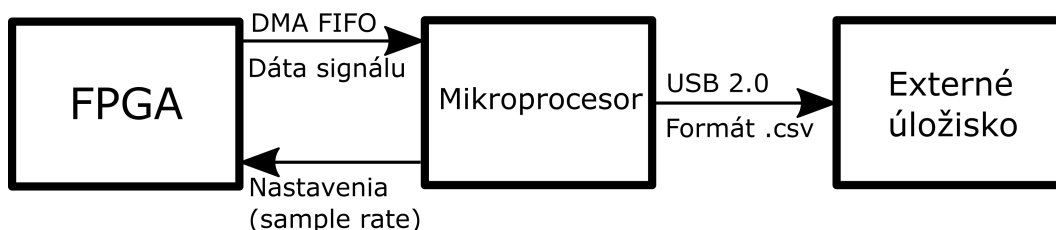
Vibrácie mechanických strojov môžu dosahovať frekvencií až 16000 Hz [9]. Aby bolo možné takýto signál správne zrekonštruovať, potrebovali by sme vzorkovať frekvenciou minimálne 32000 Hz. Aby sa predišlo problémom s aliasingom určili sme cieľovú vzorkovaciu frekvenciu na 50000 Hz [5, 6]. Jednou z funkcií poslednej aplikácie je možnosť sledovať aktuálny meraný signál v časovej doméne na grafe. Preto je potrebné mať plynulú aktualizáciu grafu, čo docielime vhodným prevzorkovaním signálu.

5.1. Aplikácia na záznam a ukladanie signálov

Táto kapitola bude hovoriť o vývoji a fungovaní aplikácie, ktorá dokáže zdigitalizovať analógový signál a uložiť ho na externé úložisko.

5.1.1. Fungovanie aplikácie

Na presné zrekonštruovanie analógového signálu potrebujeme konštantný vzorkovací krok (doba medzi jednotlivými vzorkami). Jadrom tejto aplikácie je *while loop*, v ktorom sa nachádza funkcia na čítanie hodnoty z AD prevodníka. Taktiež sa tu nachádza funkcia *Wait Until Next Multiple* ktorou zapríčiníme, že medzi jednotlivými iteráciami bude konštantná čakacia doba. Zmenou tejto doby, meníme vzorkovaciu frekvenciu.



Obr. 5.1: Bloková schéma prenosu dát

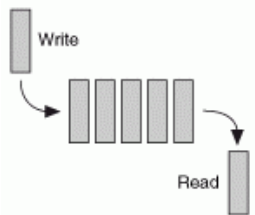
Vzorkovanie signálu prebieha na FPGA (programovateľnom hradlovom poli). Tieto „surové dáta“ sú v blokoch posielané pomocou DMA FIFO do mikroprocesora. Prenos dát pomocou DMA FIFO je efektívnejší, ak sú dáta posielané do mikroprocesora vo väčších blokoch na rozdiel od jednotlivých vzoriek. Experimentovaním sme určili veľkosť optimálneho prenášaného bloku na 1 sekundu záznamu čo znamená že, pri vzorkovacej frekvencii 20 kHz bude veľkosť preneseného bloku 20000 vzoriek. Mikroprocesor bloky postupne spája do jedného signálu a zároveň má za úlohu nastavovať z akého analógového vstupu a pri akej vzorkovacej rýchlosti má FPGA signál zaznamenávať. Signál je po dobu nahrávania ukladaný do medzipamäte. Pri ukončení nahrávania mikroprocesor vytvorí časový vektor ktorý priradí k zaznamenanému signálu (vytvorí 2D maticu). Na prvú pozíciu v maticu sa zároveň uloží informácia o vzorkovacej frekvencii. Táto matica bude následne uložená v súborovom formáte .csv¹ na externé úložisko pomocou rozhrania USB 2.0.

¹Comma separated values

5.1. APLIKÁCIA NA ZÁZNAM A UKLADANIE SIGNÁLOV

DMA FIFO

Direct memory access (DMA) je typom dátového prenosu medzi FPGA a procesorom, fungujúceho na *First-in, first-out* (FIFO) princípe.



Obr. 5.2: Elementy presúvajúce sa cez FIFO [35]

V našom prípade, kedy sa dáta z FPGA posielajú do procesora, to bude fungovať nasledovne. DMA FIFO alokuje vyrovnávaciu pamäť na strane procesora aj FPGA a FPGA bude postupne do vyrovnávacej pamäte zapisovať dáta. Hodnota ktorá sa prvá dostala do pamäte na strane FPGA sa preniesie do pamäte na strane procesora. [23, 24]

5.1.2. Vlastnosti aplikácie

Aplikácia nám umožňuje záznam elektrického signálu, privedeného na analógové vstupy, s maximálnou vzorkovacou frekvenciou 50 kHz. Táto vzorkovacia frekvencia by mala byť plne dostačujúca pre záznam signálov z merania dynamických sústav. Keďže AD prevodník v kите myRIO má 12 bit rozlíšenie (4096 kvantizačných úrovní) a merací rozsah $E = \pm 10$ V, minimálna napäťová zmena na vstupe ΔU ktorú dokážeme zaznamenať bude 4,88 mV (vzťah 5.1).

$$\Delta U = \frac{E}{2^{12}} = \frac{20V}{4096} = 0,00488V \quad (5.1)$$

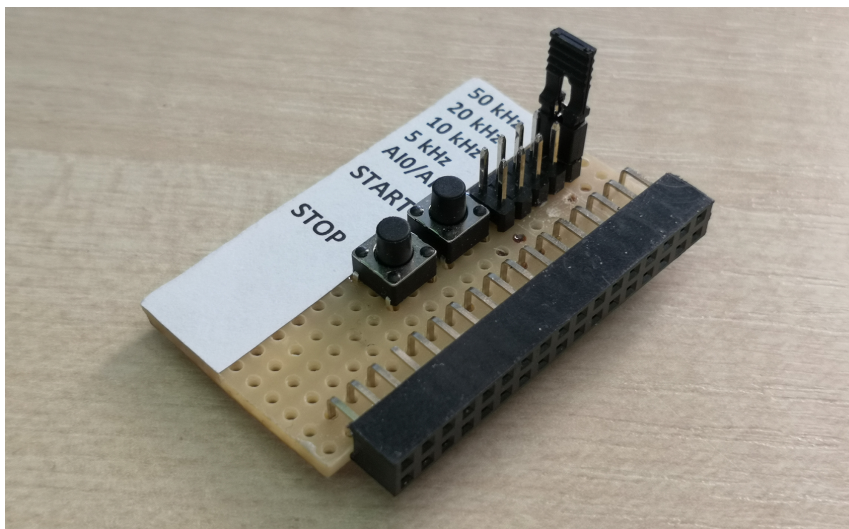
Táto aplikácia funguje ako tzv. „standalone aplikácia“, ktorá funguje aj keď myRIO nieje pripojené k počítaču. Program je trvale uložený vo vnútornej pamäti kitu myRIO a spustiť ho môžeme v nastaveniach kitu pomocou NI MAX² alebo internetového prehliadača.

Ovládanie

MyRIO má iba jedno vstavané tlačidlo, preto na ovládanie aplikácie využívame digitálne vstupy na konektore MXP A (obr. 3.2) a ovládač (obr. 5.3), ktorý je s týmto konektorom kompatibilný.

Ovládač sa skladá z univerzálnej dosky plošných spojov (DPS), z 5 „jumperov“ ktorými nastavujeme vzorkovaciu frekvenciu a vyberáme medzi analógovými vstupmi (AI0/AI1), a dvoma tlačidlami (START, STOP) ktorými púšťame a vypíname záznam. Záznam sa uloží automaticky po stlačení tlačidla STOP.

²Program na konfiguráciu zariadení od National Instruments



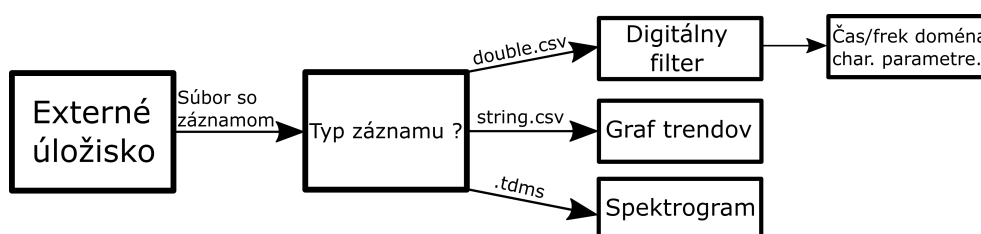
Obr. 5.3: Plošný spoj využívaný na ovládanie aplikácie

Využitie formátu .csv

Súborový formát .csv je veľmi jednoducho využiteľný aj v ďalších programoch, ako napr. Matlab alebo v programovacom jazyku Python. V Matlabe sa nachádza *Signal Processing Toolbox* ktorý obsahuje funkcie a aplikácie na analýzu a spracovanie signálov.

5.2. Aplikácia na analýzu zaznamenaných dát

Po zaznamenaní signálu môžeme pristúpiť k jeho analýze. Táto kapitola sa bude zaoberať vývojom aplikácie, ktorá nám umožní prezretie signálu v časovej doméne, meranie maximálnej amplitúdy alebo priemernej a RMS hodnoty signálu a zároveň bude obsahovať nástroje ako FFT alebo digitálne filtre.



Obr. 5.4: Bloková schéma aplikácie

5.2.1. Záznamové typy

Aplikácia pracuje s tromi „záznamovými typmi“ (obr. 5.4). Naša prvá aplikácia na záznam signálov (kapitola 5.1) generuje 2D maticu *floating-point*³ čísel a ukladá ju do súboru vo formáte .csv.

Ďalšia aplikácia, ktorej sa budeme venovať v kapitole 5.3, však okrem ukladania neupraveného signálu, dokáže dlhodobo ukladať aj charakteristické parametre (max amplitúda,

³Číslo s pohyblivou rádovou čiarkou

5.2. APLIKÁCIA NA ANALÝZU ZAZNAMENANÝCH DÁT

RMS hodnota) a FFT obrazy signálu. Pri zázname charakteristických parametrov je vytváraná 2D matica dátového typu *string* ktorá je uložená vo formáte .csv. FFT obrazy sú ukladané vo formáte .tdms⁴.

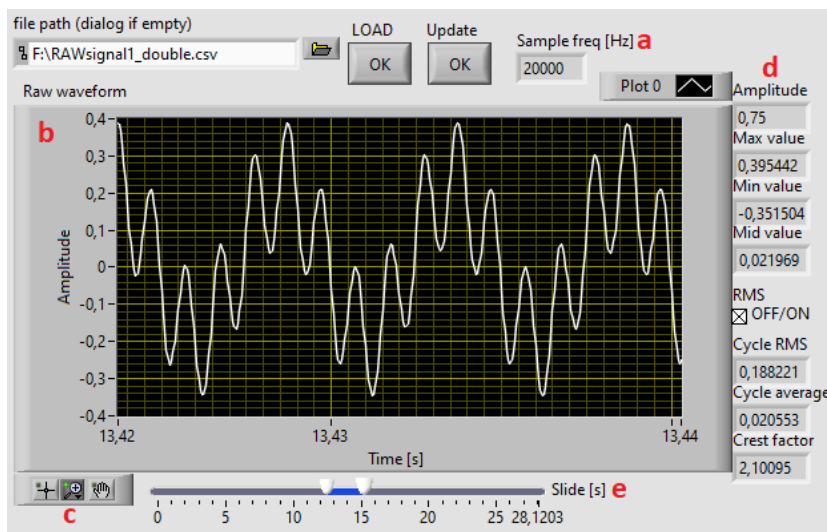
Aplikácia potrebuje rozlíšiť medzi týmito 3 typmi. Ak nahráme do aplikácie súbor s FFT obrazmi, aplikácia si všimne na konci názvu .tdms a spustí časť kódu, ktorá zo súboru získa dáta. Neupravený signál aj charakteristické parametre majú súborový formát .csv, preto sa pri ich ukladaní vloží na koniec názvu slovo, vďaka ktorému ich aplikácia dokáže rozlíšiť. Pre neupravený signál slovo *double* a pre char. parametre slovo *string*.

5.2.2. Funkcie na analýzu

Signál v časovej doméne

Po nahratí súboru so signálom sa z neho získajú dáta a dočasne sa uložia do vnútornej pamäte. Z prvej pozície v matici sa získa vzorkovacia frekvencia ktorou bol signál zaznamenaný (obr. 5.5 a) a z ostatných hodnôt sa vytvorí graf závislosti amplitúdy na čase (obr. 5.5 b). V našom prípade je na grafe signál zložený z 2 sinusoíd o frekvencii 200 a 1000 Hz. Na grafe sa nachádzajú aj funkcie ako zoom a pan (obr. 5.5 c).

Už zo signálu v časovej doméne dokážeme získať mnoho informácií, no nie vždy to môže stačiť. Preto sú z vybraného signálu automaticky počítané charakteristické parametre (obr. 5.5 d). Medzi ne patrí peak-to-peak amplitúda, max/min hodnota signálu, stredová hodnota, priemerná/RMS hodnota signálu a crest faktor. Ak nechceme tieto parametre získavať z celého signálu, ale iba z jednej určitej časti, môžeme k tomu využiť posuvný ovládač (obr. 5.5 e) ktorým vyrežeme zo signálu požadovaný úsek.



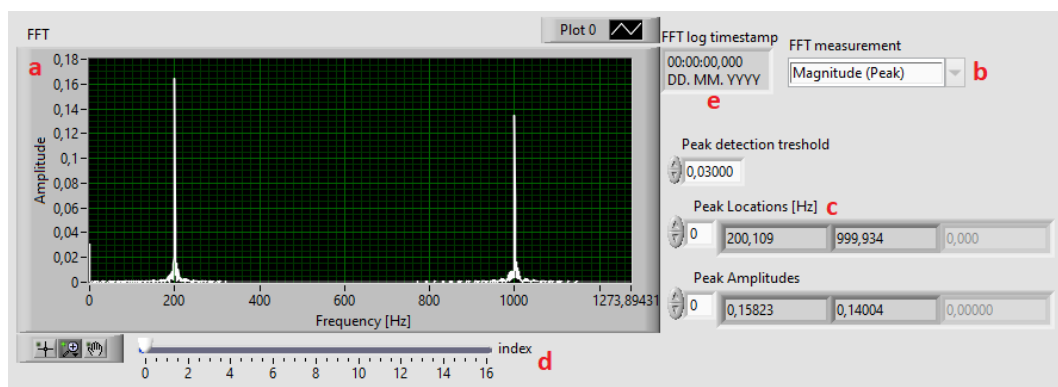
Obr. 5.5: Analýza zaznamenaného signálu v časovej doméne

Signál vo frekvenčnej doméne

Signál v časovej doméne sa pomocou FFT algoritmu transformuje do frekvenčnej domény, kde amplitúda nieje závislá na čase ale na frekvencii (spektrum). Po nahratí súboru so

⁴Súborový formát od National Instruments

signálom sa automaticky vykoná časť kódu, ktorá signál transformuje do frekvenčnej domény. Obrázok 5.6a obsahuje transformovaný signál z obrázku 5.5. Na grafe sú vidieť dva vrcholy, vo frekvenciách 200 a 1000 Hz, čo nám hovorí že vstupný signál sa skladal z týchto frekvenčných komponentov.



Obr. 5.6: Analýza zaznamenaného signálu vo frekvenčnej doméne

Pomocou combo boxu (obr. 5.6b) si môžeme vybrať aké FFT meranie chceme vykonať. Na výber je Magnitude (RMS), Magnitude (Peak), Power spectrum, Power spectral density. Napríklad, ak máme vybrať možnosť Magnitude (RMS) a analyzujeme sínusový signál o frekvencii f Hz a amplitúde A (v našom prípade vo voltoch), tak na grafe (obr. 5.6a) bude vrchol na pozícii f Hz a o veľkosti $0,707A$ V. Meranie Power spectra nám ukáže ako je energia signálu rozložená do jednotlivých frekvencií (jednotka V^2/Hz).

Spolu s FFT využívame aj *peak detection* funkciu na hľadanie vrcholov v FFT obraze. Ak niektorý vrchol presiahol nastavenú hranicu, tak sa jeho frekvencia a amplitúda zobrazí vedľa grafu (obr. 5.6c).

Časovo-frekvenčná doména

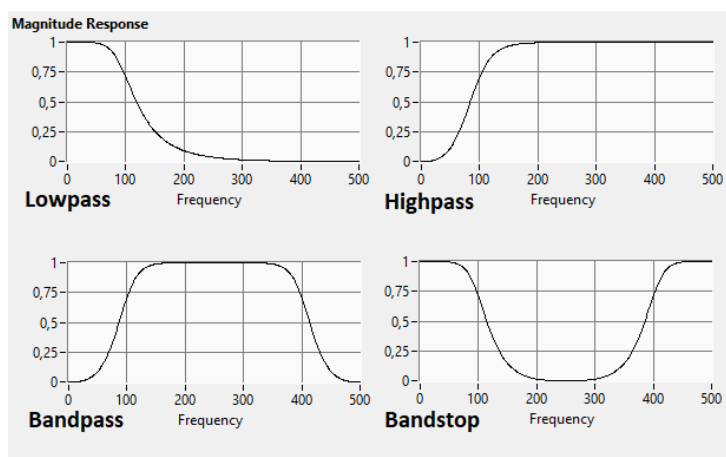
Záznam v časovo-frekvenčnej doméne nám umožní sledovať ako sa vyvíjalo spektrum (FFT obraz) v závislosti na čase. Tento záznam je uložený vo formáte .tdms. Po nahratí .tdms súboru sa automaticky vykreslí prvý FFT obraz v grafe (obr. 5.6a) a posúvaním ovládača pod grafom (obr. 5.6d) meníme obrazy. Každé spektrum má pri sebe čas aj dátum (obr. 5.6e), aby bolo možné určiť, kedy nastala určitá zmena v signáli.

Digitálny filter

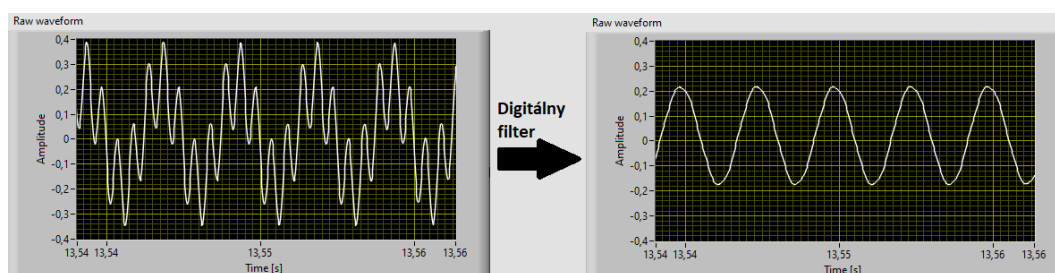
V našej aplikácii je možné využiť aj digitálny filter, konkrétne Butterworth filter zo *Signal processing* knižnice. Typy filtru sú Lowpass, Highpass, Bandpass a Bandstop a ich frekvenčné odozvy sú na obrázku 5.7 (low cutoff: 100Hz, high cutoff: 400 Hz).

Digitálny filter môžeme využiť ak potrebujeme napríklad odfiltrovať vysokofrekvenčné komponenty signálu (obr. 5.8), alebo ak chceme analyzovať iba určitý frekvenčný interval (bandpass). Na ľavej strane obrázku 5.8 je signál zložený z 200 a 1000 Hz sinusoíd. Na filtrovanie je použitý typ lowpass s cutoff frekvenciou v 300 Hz a filtrom 3 rádu. Na pravej strane vidíme vyfiltrovaný signál, ktorý sa skladá zo sinusoidy o frekvencii 200Hz.

5.2. APLIKÁCIA NA ANALÝZU ZAZNAMENANÝCH DÁT



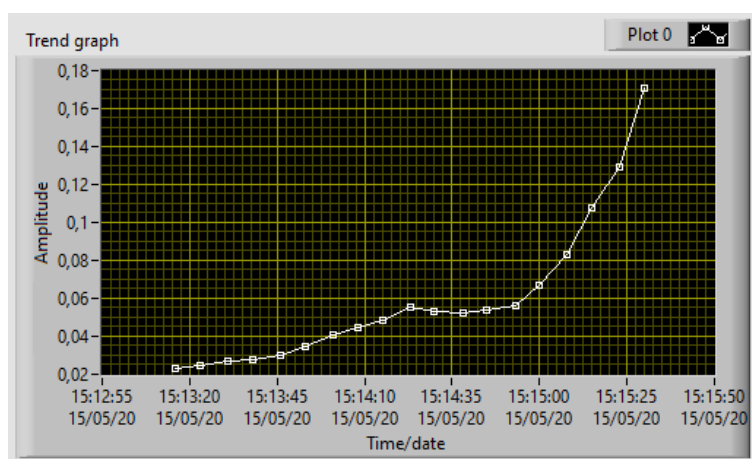
Obr. 5.7: Frekvenčné odozvy rôznych typov Butterworth filtra [36]



Obr. 5.8: Odfiltrovanie vysokofrekvenčnej časti signálu

5.2.3. Analýza trendov

Vďaka aplikácii z kapitoly 5.3 vieme dlhodobo zaznamenávať charakteristické parametre meraného signálu. Tieto záznamy sú dobre využiteľné napríklad pri prediktívnej údržbe. Dlhodobým zaznamenávaním RMS hodnoty signálu alebo crest faktoru, vieme kontrolovať ako sa tieto hodnoty časom vyvíjajú a dokážeme si včas všimnúť začínajúcu poruchu.

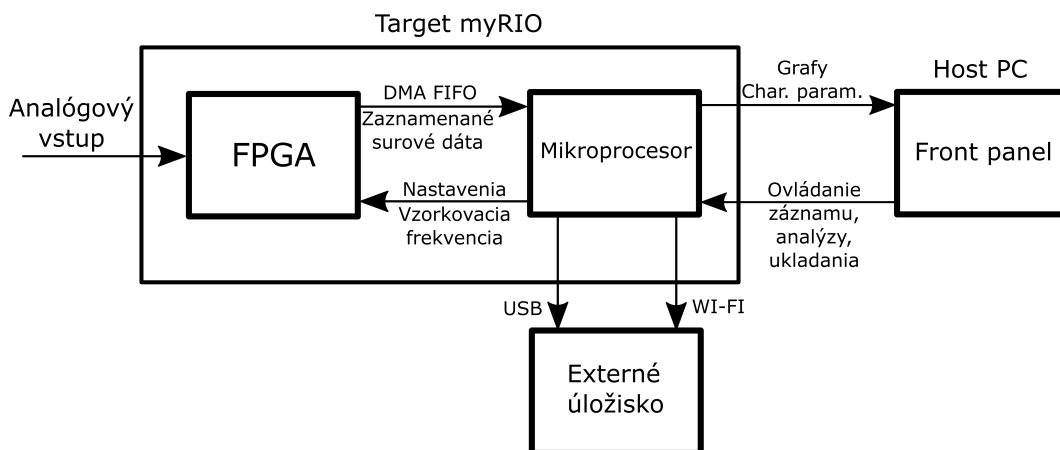


Obr. 5.9: Vývoj RMS hodnoty signálu

Súbor s týmto typom záznamu obsahuje 2D maticu v ktorej sa nachádza zaznamenaná hodnota spolu s dátumom a časom kedy bola odmeraná. Keďže je to matica dátového typu *string*, je najprv konvertovaná na dátové typy *float* a *timestamp*, ktoré už dokáže LabVIEW graf vykresliť.

5.3. Aplikácia na real-time analýzu signálu

Aplikácia nám dáva možnosť záznamu a analýzy signálu v reálnom čase a obsahuje nástroje na ukladanie charakteristických parametrov. Okrem analógových vstupov C/AI0 a C/AI1 je možnosť využiť aj audio vstup a vstavaný 3-osový akcelerometer.



Obr. 5.10: Bloková schéma aplikácie

5.3.1. Záznam signálu a jeho zobrazenie

Zber dát funguje podobne ako v aplikácii z kapitoly 5.1, kde FPGA zaznamenáva hodnoty zo vstupu a tieto dáta sú následne prenášané do mikroprocesora pomocou DMA FIFO. Na front paneli sa nachádza graf kde sa zobrazujú zaznamenané dáta (napätie/zrýchlenie v závislosti na čase). Keďže prenos dát pomocou DMA FIFO je najefektívnejší ak prenášame veľké bloky, ale zároveň chceme vidieť ako sa signál mení v reálnom čase, je potrebné nastaviť vhodnú veľkosť prenášaných blokov. Blok musí byť dostatočne veľký aby bol prenos dát medzi FPGA a mikroprocesorom rýchly, a zároveň dostatočne malý aby bola zabezpečená hladká aktualizácia grafu. Veľkosť bloku je závislá na vzorkovacej frekvencii FPGA. Experimentovaním sme sa dostali ku kvadratickej rovnici závislosti vzorkovacej frekvencie f_s [Hz] na optimálnej veľkosti bloku B [počet hodnôt] (vzťah 5.2). Pomocou numerického ovládača na front paneli nastavíme požadovanú vzorkovaciu frekvenciu („sample rate“) a program na základe vzťahu 5.2 určí veľkosť blokov ktorými budeme dáta z DMA FIFO získavať.

$$B = 3,515 \cdot 10^{-7} f_s^2 + 2,242 \cdot 10^{-3} f_s + 9,875 \quad (5.2)$$

Na sledovanie signálu v reálnom čase, zobrazenie meraní tohto signálu a ovládanie aplikácie využívame *Front panel komunikáciu* medzi targetom (myRIO) a hostom (desktop PC). Front panel komunikácia vyžaduje aby host PC mal nainštalovaný LabVIEW a funguje tak, že front panel (ovládacie prvky, grafy...) je spustený na host PC a block diagram (program) je spustený na myRIO targete. Dáta sú prenášané pomocou *Academic RIO Device network connection* (USBLAN alebo Wi-Fi). Prenášaním veľkého množstva dát ale narážame na limity tejto komunikácie.

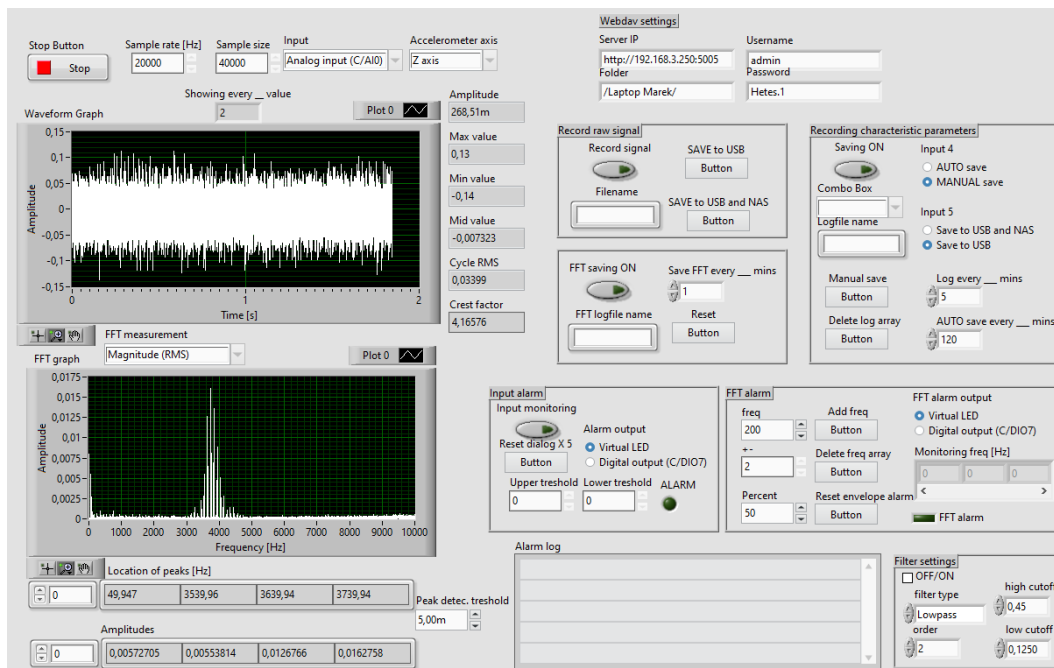
5.3. APLIKÁCIA NA REAL-TIME ANALÝZU SIGNÁLU

Prevzorkovanie

Okrem nastavovania vzorkovacej frekvencie nastavujeme pomocou numerického ovládača aj veľkosť záznamu („sample size“). Toto číslo udáva z koľko vzoriek sa počíta FFT, charakteristické parametre a koľko vzoriek sa objaví v grafe. Ak bude sample size príliš veľký, tak front panel komunikácia nebude stíhať zobrazovať každú jednu vzorku, a aktualizácia grafu už nebude plynulá. Preto je od určitej sample size potrebné signál prevzorkovať. Táto hranica bola experimentálne stanovená na približne 60000 vzoriek. Prevzorkovanie funguje tak, že od tejto sample size hranice sa v grafe nebudú zobrazovať všetky hodnoty. Pomocou funkcie *Quotient and Remainder* (rovnaká ako funkcia *modulo* z textových programovacích jazykov) vyberieme zo záznamu každú n hodnotu, ktorá sa potom zobrazí v grafe. Pri 60000 vzorkách stačí, ak bude v grafe zobrazená každá 2. hodnota ($n = 2$), ale pri väčšom sample size musí byť hodnota n pre plynulý chod programu vyššia. Závislosť hodnoty n na hodnote sample size S nám určuje lineárna rovnica zo vzťahu 5.3.

$$n = 2,5 \cdot 10^{-5} S \quad (5.3)$$

Prevzorkovaný signál sa však využíva iba v grafe. Ďalšia analýza a výpočty, ako napríklad FFT, sú vykonané z neprevzorkovaného signálu.



Obr. 5.11: Front panel aplikácie

5.3.2. Spracovanie a ukladanie dát

Surové zaznamenané dáta sa zobrazia na grafe, na ľavej strane front panelu (obr. 5.3) a následne sa z nich vypočítajú charakteristické parametre a FFT alebo ich môžeme upraviť digitálnym filtrom, podobne ako v aplikácii z kapitoly 5.2. Výhodou tejto aplikácie je, že sa k týmto spracovaným dátam dostaneme okamžite, bez nutnosti ukladania na externé úložisko. Pravá strana front panelu slúži na nastavenie ukladania a alarmov (obr. 5.3).

Ukladanie charakteristických parametrov

Ak chceme dlhodobo monitorovať signál, napríklad vibračný signál z mechanického zariadenia, nieje potrebné ukladať surové dáta. Stačí nám ukladanie charakteristických parametrov ako je maximálna amplitúda alebo RMS.

Na front paneli je textový box v ktorom si môžeme vybrať požadovaný parameter a virtuálnym tlačidlom spustíme jeho záznam. Hodnota parametru sa bude zapisovať do matice a bude k nej pridelený dátum a čas („timestamp“) merania. Keďže timestamp je dátový typ *string*, musíme aj hodnotu parametru previesť na *string* pretože LabVIEW nedovolí vytvoriť maticu z rôznych dátových typov.

Je tu možnosť nastavenia, pomocou numerického ovládača, ako často sa má daný parameter merať (v minútach). Súbor so záznamom môžeme uložiť manuálne, stlačením virtuálneho tlačítka, alebo automatické. Na ukladanie využívame funkciu *Write delimited spreadsheet VI*, ktorá maticu uloží v súborovom formáte .csv. Čas po ktorom sa súbor automaticky uloží sa takisto nastavuje numerickým ovládačom. Program kontroluje uplynulý čas porovnávaním timestampu z prvého merania a aktuálneho timestampu.

Pretože myRIO obsahuje WI-FI modul, máme možnosť ukladať súbor aj bezdrôtovo na sieťové úložisko (NAS). Na sieťový prenos dát využívame WebDAV protokol, ktorého funkcie sa nachádzajú v *Data communication* knižnici.

Ukladanie FFT obrazov

FFT je jeden z najdôležitejších nástrojov pri analýze signálov, ktorým zistíme rozloženie energie signálu v rôznych frekvenciách. Ukladaním FFT môžeme potom pozorovať, ako sa jednotlivé komponenty signálu vyvíjajú časom.

Surové zaznamenané dáta sú pomocou funkcie *Spectral measurements* transformované z časovej domény do frekvenčnej, a následne sú zobrazené na grafe. Na ukladanie týchto dát využívame LabVIEW funkcie z knižnice *TDM Streaming*. TDM je dátový model vyvinutý National Instruments a je veľmi dobre využiteľný v tomto prípade, keď potrebujeme ukladať viac FFT obrazov do jedného súboru. Pri spustení ukladania FFT, sa vytvorí na externom úložisku súbor s koncovkou .tdms, do ktorého sa bude postupne ukladať FFT obraz aj s informáciou o dátume a čase.

Tento aj predchádzajúci súbor so záznamom môžeme prehliadať v aplikácii z kapitoly 5.2.

5.3.3. Alarmy

Posledná časť aplikácie sa skladá z 2 alarmov, ktoré môžeme využiť pri monitorovaní zariadení. Ak signál presiahne predom nastavenú hranicu, tak sa do textového pola *Alarm log* na front paneli zapíše čas a dátum, a s využitím digitálneho výstupu kitu myRIO a relé sa môže merané zariadenie odpojiť od elektrickej energie.

Amplitude alarm

Tento alarm funguje tak, že zaznamenanú hodnotu zo vstupu, porovnáva s nastavenou vrchnou a spodnou hranicou. Ak hodnota zo vstupu presiahne túto hranicu, tak sa do Alarm logu zapíše čas, a na virtuálnu LED alebo digitálny výstup C/DIO7 sa zapíše

5.3. APLIKÁCIA NA REAL-TIME ANALÝZU SIGNÁLU

logická 1. Log 1 bude na výstupe zapísaná až dotedy, dokiaľ nestlačíme tlačidlo Reset na front paneli.

Frekvenčný alarm

Frekvenčný alarm nekontroluje priamo hodnotu vstupu, ale kontroluje nami vybranú frekvenciu v FFT obraze. Pomocou numerických ovládačov si nastavíme frekvenciu ktorú chceme monitorovať, a hranicu v percentách. Je možné sledovať viac frekvencií naraz. Ak niektorá prekročí hranicu, do Alarm logu sa zapíše čas a frekvencia. Takisto je tu možnosť využitia digitálneho výstupu.

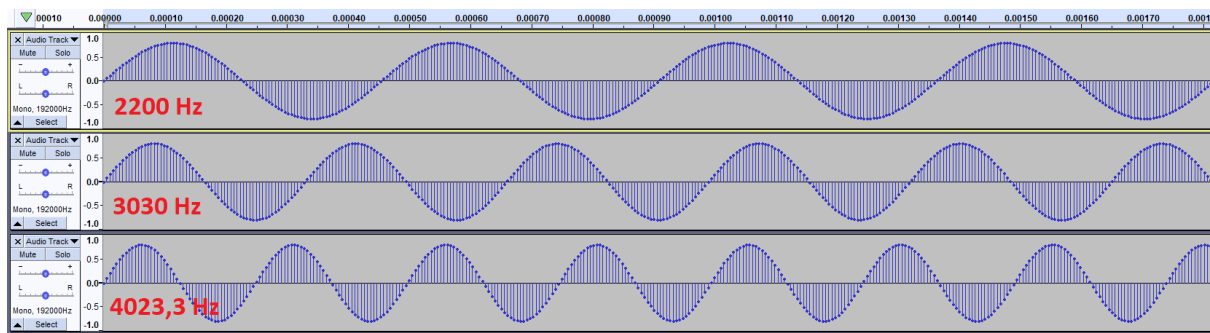
6. Praktická demonstrace

Závěrečné testovanie spočíva v zázname a analýze rôznych druhov signálov pomocou našich aplikácií z predošlej kapitoly. Na generáciu signálov využívame audio výstup stolného počítača spolu s audio softvérom *Audacity*¹ [25]. Zvuková karta v počítači má DA¹ prevodník s 24 bit rozlíšením a vzorkovacou frekvenciou 192 kHz, čo môžeme považovať za dostatočne reprezentatívny zdroj signálu.

6.1. Záznam a analýza sínusových signálov

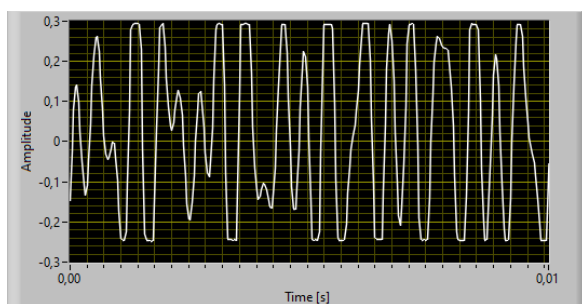
6.1.1. Kombinácia 3 sínusových signálov

Referenčný signál sa skladal z 3 sínusových komponentov s rovnakými amplitúdami, a o frekvenciách 2200 Hz, 3030 Hz a 4023,3 Hz (obr. 6.1), ktorý bol zo zvukovej karty privedený na audio vstup kitu myRIO.

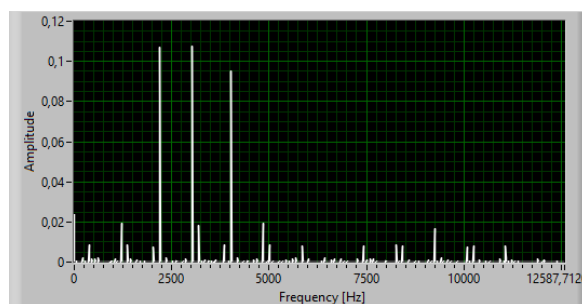


Obr. 6.1: Generovanie signálu v programe Audacity

Generovaný signál sme zaznamenávali pomocou aplikácie z kapitoly 5.3. Aplikáciu sme mali nastavenú na maximálnu vzorkovaciu frekvenciu $f_s = 50$ kHz. Dĺžka záznamu bola 16 sekúnd a bol uložený do .csv súboru s výslednou veľkosťou 14,7 MB. Následne bol tento signál analyzovaný pomocou aplikácie z kapitoly 5.2.



(a)



(b)

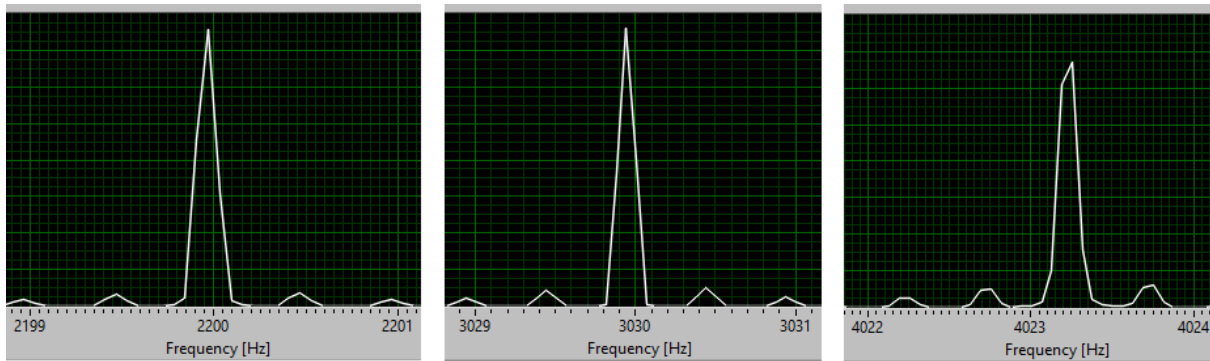
Obr. 6.2: Zaznamenaný signál v časovej a frekvenčnej doméne

Na obrázku 6.2a môžeme vidieť priblížený signál v časovej doméne. Viac informácií ale získame z grafu signálu vo frekvenčnej doméne, ktorý je na obrázku 6.2b. Tu vidíme 3 najvyššie vrcholy, ktoré súvisia s jednotlivými sínusovými komponentami signálu. Nachá-

¹Digital to analog

6.1. ZÁZNAM A ANALÝZA SÍNUSOVÝCH SIGNÁLOV

dzajú sa tu však aj nižšie vrcholy, ktoré pravdepodobne súvisia s rušením, alebo s tým, že náš generátor signálu nieje ideálny.

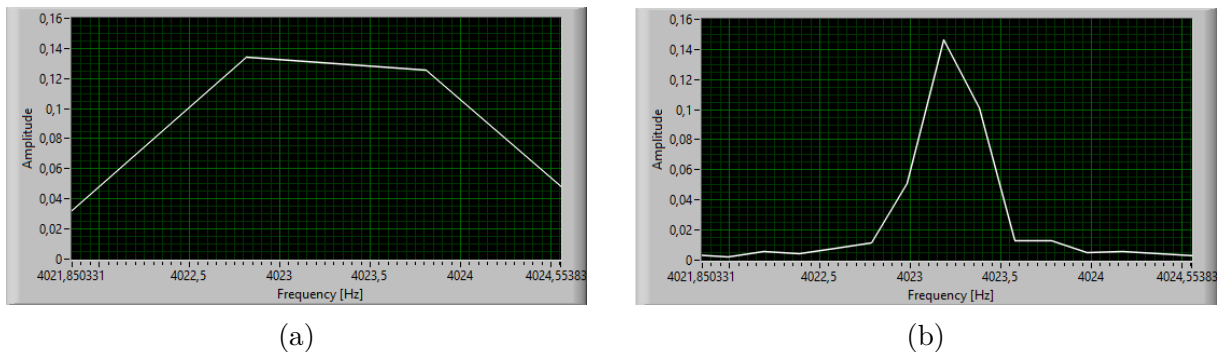


Obr. 6.3: Priblíženie vrcholov z obrázku 6.2b

Priblížením týchto vrcholov (obr. 6.3) sa môžeme presvedčiť o tom, že sa naozaj nachádzajú vo frekvenciách z ktorých sa náš signál skladal. Konkrétne pozície vrcholov sú 2199,95 Hz, 3029,95 Hz a 4023,23 Hz, ktoré sme zistili pomocou *peak detection* funkcie.

Rozlíšenie FFT

V kapitole 4.3.2 sme zistili, že frekvenčné riadkovanie („rozlíšenie FFT“) je závislé na vzorkovacej frekvencii a počte vzoriek podľa vzťahu 4.4.



Obr. 6.4: Zaznamenaný signál v časovej a frekvenčnej doméne

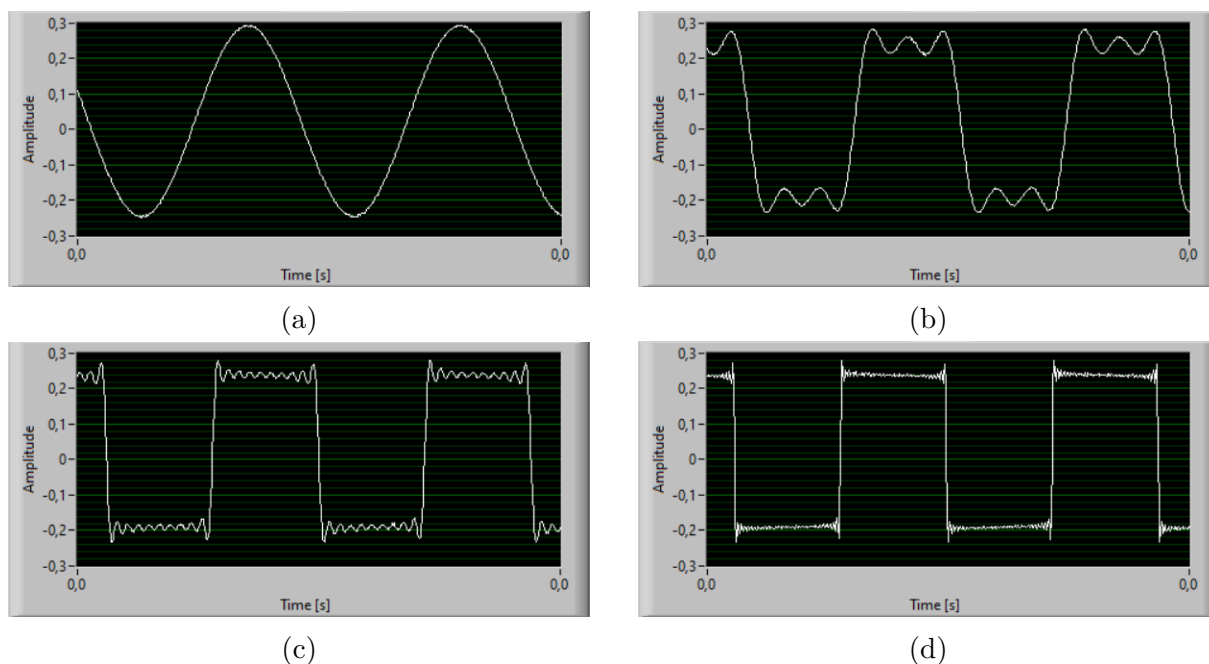
Pri výpočte FFT iba z jednej sekundy nášho signálu (čo je 50000 vzoriek), bude frekvenčné riadkovanie $\Delta f = f_s/N = 50000/50000 = 1$ Hz a bude obtiažne určiť presnú pozíciu vrchola (obr. 6.4a). Zvyšovaním počtu vzoriek sa zlepší toto rozlíšenie. V prípade obrázku 6.4b máme zo signálu 5 sekundový úsek, pre ktorý bude $\Delta f = 0,2$ Hz a budeme vedieť ľahšie určiť pozíciu vrchola.

6.1.2. Štvorcový signál pomocou kombinácie sínusových signálov

Z Fourierovich radov vieme, že ľubovoľnú funkciu dokážeme aproximovať pomocou radu sínusových a kosínusových funkcií. Štvorcový signál (funkciu) $f(t)$ dokážeme matematicky vo Fourierovej rade vyjadriť ako nekonečný súčet sínusových funkcií s nepárnymi harmonickými frekvenciami (vzťah 6.1).[26]

$$f(t) = \sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) + \dots \quad (6.1)$$

Toto tvrdenie môžeme overiť tak, že v programe Audacity budeme kombinovať sínusové signály nepárnych harmonických frekvencií podľa vzťahu 6.1 a po súčte dostatočného množstva týchto sínusoviek, by sa mal výsledný signál podobat štvorcovému. Na analýzu výsledného signálu sme použili aplikáciu z kapitoly 5.3.



Obr. 6.5: Postupná kombinácia sínusoviek nepárnych harmonických frekvencií

Základná sínusová funkcia bola o frekvencii 200 Hz a jej amplitúda bola v programe Audacity nastavená na hodnotu 1 (obr. 6.5a). Obrázok 6.5b obsahuje už kombináciu 3 sínusoviek o frekvenciách 200 Hz, 600 Hz, 1000 Hz a amplitúdach 1, 0,33 a 0,2 (podľa vzťahu 6.1). Tu môžeme vidieť, že sa výsledný signál začína podobat štvorcovému. Pričítaním ďalších sínusových komponentov sa bude k nemu viac približovať. Na obrázku 6.5c je kombinácia 10 a na obrázku 6.5d je kombinácia 31 sínusových funkcií.

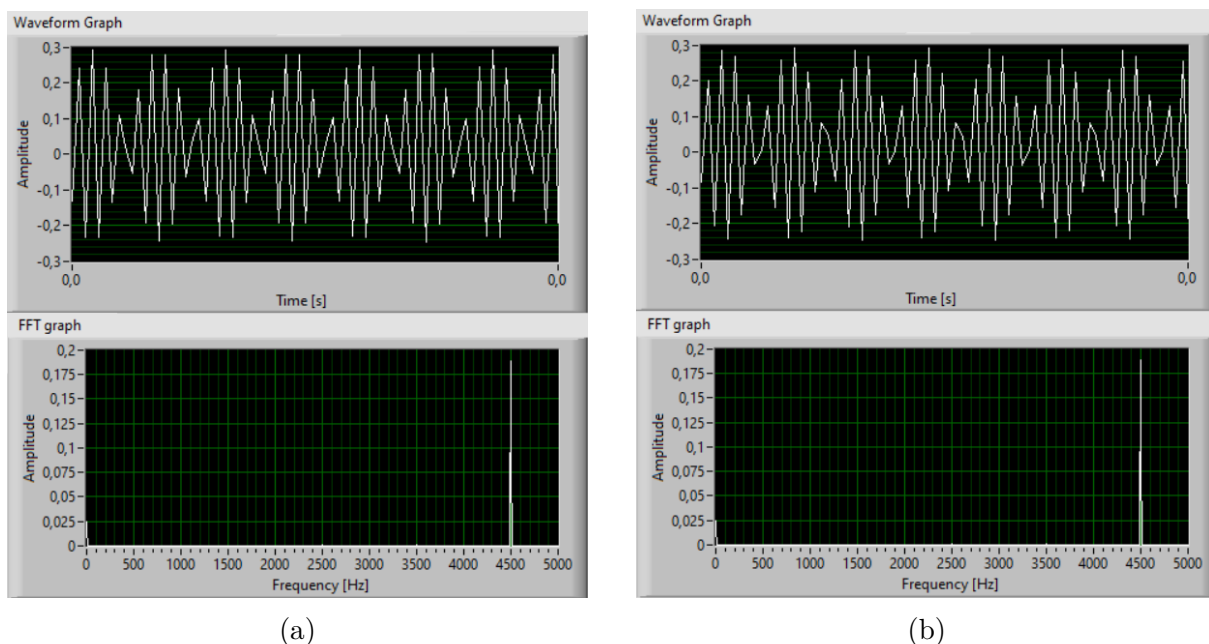
6.1.3. Aliasing

V kapitole 3.1.2 sme spomenuli problém s aliasing efektom pri ktorom sa frekvencie vyššie ako $f_s/2$ javia ako nižšie. V našej aplikácii sme teraz mali vzorkovaciu frekvenciu f_s nastavenú na 10000 Hz čo znamená, že Nyquistova frekvencia bola $f_s/2 = 5000$ Hz. V Audacity sme generovali 2 sínusové signály o frekvenciách 4500 Hz a 5500 Hz.

Pri analýze signálu o frekvencii 4500 Hz bolo Nyquistovo kritérium splnené ($f_s = 10000$ Hz $\geq 2f_{max} = 9000$ Hz) a na obrázku 6.6a môžeme v grafe FFT vidieť jasný vrchol v tejto frekvencii.

Pri analýze signálu o frekvencii 5500 Hz nebolo Nyquistovo kritérium splnené, pretože $f_s = 10000$ Hz $\leq 2f_{max} = 11000$ Hz. Vrchol v grafe FFT sa zrkadlovo premieta na ľavú stranu (od Nyquistovej frekvencie) a preto sme zaznamenali signál, ktorý má nižšiu frekvenciu (4500 Hz alias) (obr. 6.6b) ako mal signál pôvodný (5500 Hz). Pri tejto vzorkovacej frekvencii nedokážeme rozlíšiť či má meraný signál frekvenciu 4500 Hz alebo 5500 Hz.

6.2. TVORBA SPEKTROGRAMU Z DYNAMICKÉHO SIGNÁLU



Obr. 6.6: Dva rozdielne signály sa javia ako rovnaké kvôli nesplneniu Nyquistovho kritéria

Toto môže spôsobiť problém, kedy vysokofrekvenčné rušenie vytvára aliasy a zťažuje nám analýzu signálu. Tohto problému sa však môžeme zbaviť napríklad „oversamplingom“, čo znamená, že použijeme niekoľko násobne vyššiu vzorkovaciu frekvenciu ako je maximálna frekvencia signálu. Alebo dolnopriepustným filtrom, ktorým odfiltrujeme vysokofrekvenčné zložky signálu (frekvencie vyššie ako Nyquistova frekvencia).

6.2. Tvorba spektrogramu z dynamického signálu

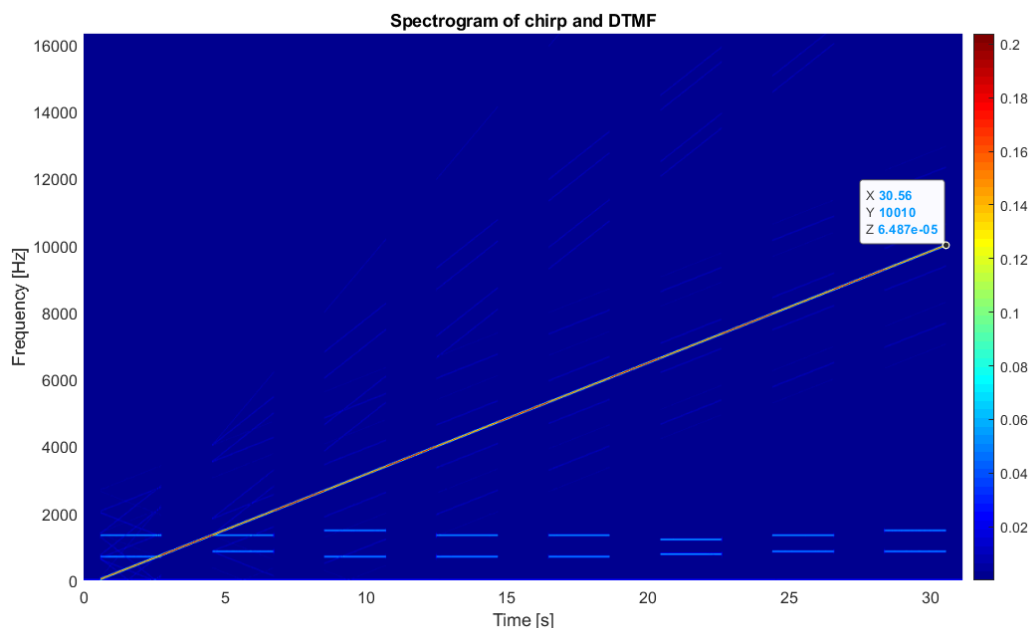
Naša aplikácia má aj funkciu na ukladanie FFT aby bolo možné analyzovať ako sa menili frekvencie signálu v čase. Tieto dáta sú ukladané vo formáte .tdms ktorý bol vyvinutý firmou National Instruments a je natívne podporovaný v prostredí LabVIEW. Ak chceme tieto dáta analyzovať napr. v prostredí Matlab, kde .tdms nieje natívne podporovaný, môžeme k tomu využiť *TDMS Reader* [27]. Táto kapitola sa zaoberá tvorbou spektrogramov v prostredí Matlab, z dát získaných pomocou našej aplikácie.

6.2.1. Chirp a DTMF tóny

Signál ktorý bol generovaný pomocou Audacity mal dĺžku 30 s a skladal sa z dvoch častí, chirp a DTMF tóny. Chirp je sínusový signál o stálej amplitúde, ktorého frekvencia sa mení časom. V našom prípade frekvencia signálu začínala na 20 Hz a lineárne sa zvyšovala až na konečnú frekvenciu 10000 Hz. Dual-tone multi-frequency alebo DTMF sú tóny ktoré sme mohli počuť napr. pri písaní na starých tlačítkových telefónoch. Tieto tóny sa skladajú z dvoch sínusoviek o rôznych frekvenciách. Naš signál obsahoval 8 DTMF tónov, každý mal dĺžku 2,2 s a nasledovala za ním 1,8 s prestávka.

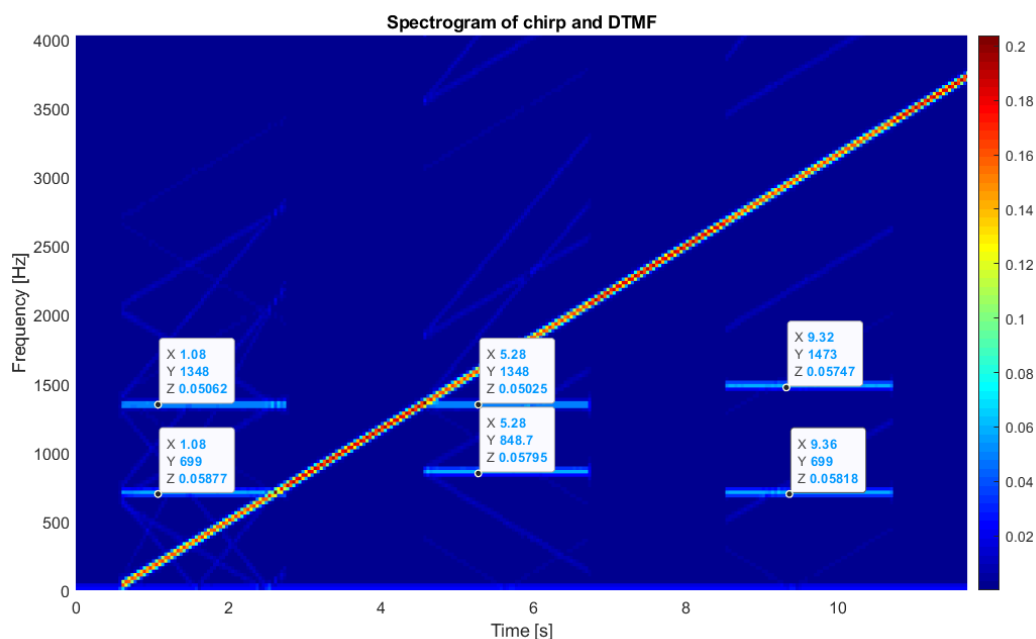
Tento signál sme následne zaznamenávali pomocou našej aplikácie, s nastavenou vzorkovacou frekvenciou 50000 Hz. FFT boli počítané z 0,04 s úsekov signálu (2000 vzoriek) a všetky boli uložené v .tdms formáte. Dáta z .tdms súbora boli v Matlabe pomocou TDMS

Reader konvertované do formátu .mat, ktorý už je v Matlabe podporovaný. Následne bol spektrogram (obr. 6.7) vytvorený s využitím funkcie *surf(X,Y,Z)*.



Obr. 6.7: Spektrogram zaznamenaného signálu

Na obrázku 6.7 je vidieť šikmá čiara ktorá reprezentuje chirp časť nášho signálu. Ako sme aj predpokladali, čiara lineárne stúpa v závislosti na čase, pretože aj frekvencia chirp signálu stúpala lineárne. Na spodnej časti obrázka môžeme vidieť horizontálne čiarky ktoré súvisia s jednotlivými DTMF tónmi. Ich frekvencie môžeme jednoducho odčítať zo spektrogramu (obr. 6.8). Frekvencie tónov, ktoré boli počítačom generované sú zapísané v tabuľke 6.1 a frekvencie tónov ktoré sme odčítali zo spektrogramu sú v tabuľke 6.2.



Obr. 6.8: Spektrogram približený na DTMF tóny

6.2. TVORBA SPEKTROGRAMU Z DYNAMICKÉHO SIGNÁLU

Pozícia	f1 [Hz]	f2 [Hz]
1	1336	697
2	1336	852
3	1477	697
4	1336	697
5	1336	697
6	1209	770
7	1336	852
8	1477	852

Tabuľka 6.1: Generované tóny

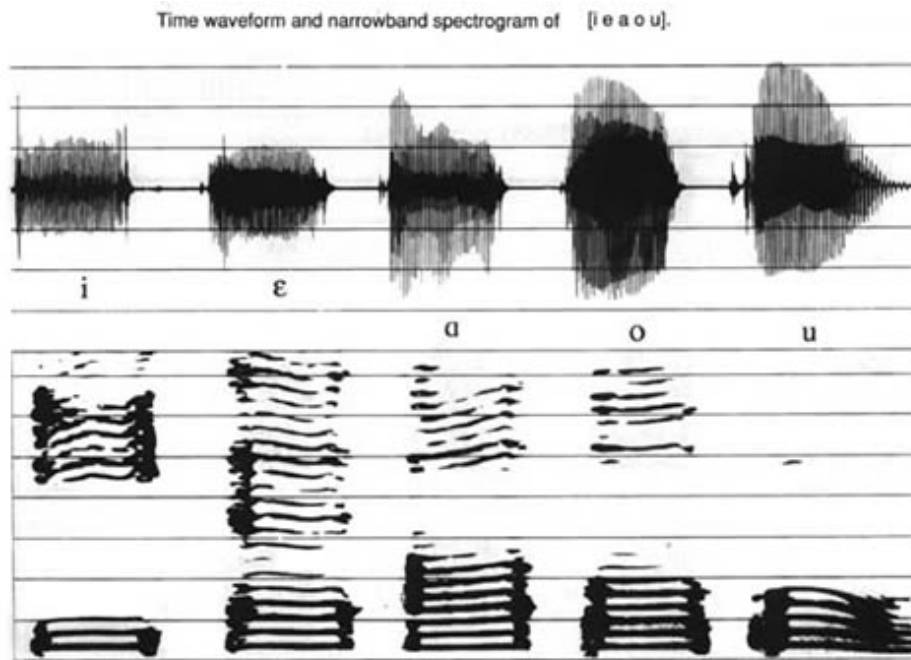
Pozícia	f1 [Hz]	f2 [Hz]
1	1348	699,0
2	1348	848,7
3	1473	699,0
4	1348	699,0
5	1348	699,0
6	1223	773,8
7	1348	848,7
8	1473	848,7

Tabuľka 6.2: Zaznamenané tóny

Zaznamenané frekvencie nie sú úplne totožné s generovanými, čo mohlo byť spôsobené nedostatočným frekvenčným riadkovaním FFT. Pretože bola vzorkovacia frekvencia $f_s = 50000$ Hz a FFT bolo počítané z $N = 2000$ vzoriek, malo FFT frekvenčné riadkovanie približne $\Delta f = 25$ Hz. To znamená, že jeden dielik na y ose bol 25 Hz, a preto nebolo možné určiť frekvenciu presne.

6.2.2. Spektrogram samohlások

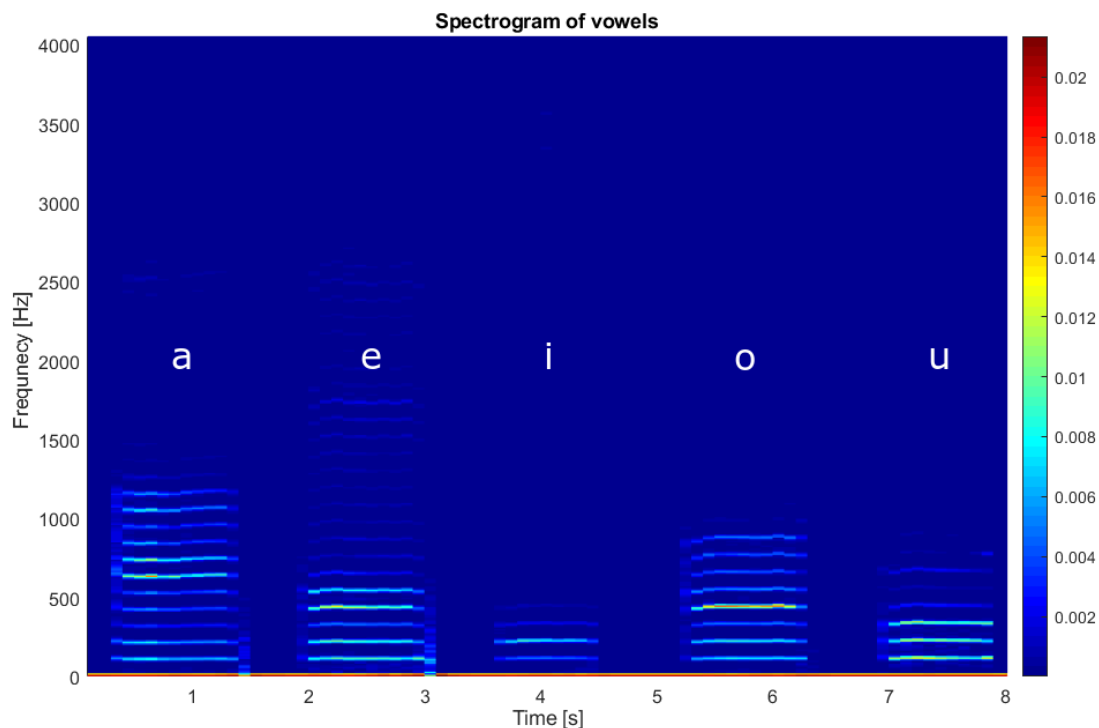
Spektrogram môžeme využiť aj pri analýze ľudského hlasu. Ľudský hlas sa skladá zo základnej frekvencie, ktorá je okolo 100-200 Hz, a niekoľko harmonických frekvencií. Na obrázku 6.9 vidíme, že sa každá samohláska vyznačuje iným množstvom harmonických frekvencií [28].



Obr. 6.9: Spektrogram hovorených samohlások [28]

K myRIO kitu sme mali pripojený mikrofón a bol spustený záznam rovnako ako v predchádzajúcej kapitole. Teraz sa však FFT počítalo z 5000 vzoriek, aby sme získali lepšie frekvenčné riadkovanie (konkrétne $\Delta f = 10$ Hz). Následne boli do mikrofónu vyslovené

samohlásky *a*, *e*, *i*, *o*, *u* v tomto poradí. Dáta boli vizualizované pomocou spektrogramu, rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcej kapitole (obr. 6.10).



Obr. 6.10: Spektrogram samohlások hovorených autorom tejto práce

Z obrázku 6.10 je jasne vidieť, že každá samohláska sa skladá z iného počtu harmonických frekvencií, a zároveň dokážeme zo spektrogramu vyčítať, že základná frekvencia všetkých samohlások bola približne 109,9 Hz. Taktiež tu môžeme vidieť aj podobnosti so spektrogramom z obrázku 6.9 ktorý pochádza z portálu National center for Voice and Speech.

7. Záver

Prvá časť práce bola o oboznámení sa s vývojovým kitom myRIO a s prostredím LabVIEW. Zistili sme informácie o hardvéri kitu myRIO, ako napr. AD prevodník, USB rozhranie a ďalších vstavaných perifériách, informácie o možnostiach prostredia LabVIEW, ako napr. funkcie pre záznam a analýzu dát, ktoré sme využívali pri návrhu aplikácií. Ďalej sme sa tu venovali jednotlivým technológiám ktoré sme v našej práci využívali, ako fungovanie AD prevodníka, FFT, grafy signálu v časovej a frekvenčnej doméne, a ich využitie vo vibrodiagnostike.

V druhej časti sme pomocou poznatkov z kapitoly 3 a 4 navrhovali systém na záznam a spracovanie signálov z merania dynamických sústav, ktorý bol rozdelený do 3 aplikácií. Prvá aplikácia bola určená čisto na záznam signálov privedených na analógový vstup kitu myRIO. Ciele ktoré sme si stanovili, ako maximálna vzorkovacia frekvencia 50000 Hz, ukladanie záznamu na externé úložisko a fungovanie aplikácie bez nutnosti pripojenia kitu myRIO k počítaču, boli splnené. Druhá aplikácia bola určená na analýzu týchto zaznamenaných signálov. Aplikácia obsahuje možnosť prezrieť si signál v časovej doméne, a pomocou FFT vo frekvenčnej doméne. Taktiež obsahuje funkcie na meranie charakteristických vlastností signálu, ako max/min hodnota alebo peak-to-peak amplitúda, a graf na analýzu trendov. Ciele poslednej aplikácie boli, „živá“ analýza signálov, čo znamená, že nám aplikácia umožňuje sledovanie aktuálneho signálu v časovej doméne a automaticky počíta FFT z nastaveného počtu vzoriek, a dlhodobé ukladanie charakteristických parametrov signálu. Pri tejto aplikácii bolo potrebné doceliť plynulú aktualizáciu grafu signálu v časovej doméne. Všetky stanovené ciele boli splnené.

Tretia časť tejto práce sa zaoberala testovaním našich aplikácií. Testovanie spočívalo v meraní a analýze signálov ktoré boli generované pomocou zvukovej karty počítača a softvéru *Audacity*®. V prvom teste bol generovaný sínusový signál ktorý sa skladal z 3 rôznych frekvencií. Tento signál bol zaznamenaný aplikáciou z kapitoly 5.3 a následne analyzovaný aplikáciou z kapitoly 5.2. Naša aplikácia dokázala s dostatočnou presnosťou určiť z akých troch frekvenčných komponentov sa signál skladal. Ďalej sme generovali signál ktorý sa skladal z 2 častí. Prvá časť bola chirp (sínusový signál ktorého frekvencia sa zvyšuje časom) a druhá bola sekvencia DTMF tónov o rôznych frekvenciách. Teraz sme ale neukladali surový signál, ale FFT z jeho malých úsekov, z ktorých sme potom pomocou softvéru *Matlab* vytvorili spektrogram (obr. 6.7). Na spektrograme sme mohli vidieť výraznú šikmú čiaru, ktorá reprezentovala stúpajúcu frekvenciu chirp signálu. A podarilo sa nám s dostatočnou presnosťou určiť aj jednotlivé frekvencie DTMF tónov. Nakoniec sme demonštrovali analýzu hovorených samohlások, rovnakým spôsobom pomocou spektrogramu. Pri jednotlivých samohláskach sme mohli vidieť určité podobnosti s dátami z portálu National center for Voice and Speech.

Literatúra

- [1] RICE, Charles. *Single Ended vs Differential Inputs*. In: SIEMENS Simcenter [online]. 2019-8-29 [cit. 2020-5-20]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/single-ended-vs-differential-inputs>
- [2] MC Measurement Computing. *mccdaq.com* [online]. [b.r.] [cit. 2020-5-20]. Dostupné z: <https://www.mccdaq.com/TechTips/TechTip-4.aspx>
- [3] FUCHS, Michael. Analog-to-Digital Converters (ADC) - Basics. In: *iMooX* [online]. TU Graz, 2019-10-11 [cit. 2020-5-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Oy8AD8maAHo>
- [4] ROHM Semiconductor. *rohm.com* [online]. [b.r.] [cit. 2020-5-20]. Dostupné z: <https://www.rohm.com/electronics-basics/ad-da-converters/what-are-ad-da-converters>
- [5] LERMAN, Gilad. The Shannon Sampling Theorem and Its Implications. In: *umn.edu* [online]. [b.r.] [cit. 2020-5-20]. Dostupné z: http://www-users.math.umn.edu/~lerman/math5467/shannon_aliasing.pdf
- [6] EFSTATHIOU, Constantinos. *Signal Sampling: Nyquist - Shannon Theorem* [online]. National and Kapodistrian University of Athens [cit. 2020-6-2]. Dostupné z: http://195.134.76.37/applets/AppletNyquist/App1_Nyquist2.html
- [7] ANDREWS, Ryan. Aliasing in ADCs: Not all signals are what they appear to be. In: *E2E™ support forums* [online]. 2015-9-4 [cit. 2020-6-2]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/archive/2015/09/04/aliasing-in-adcs-not-all-signals-are-what-they-appear-to-be
- [8] RANDALL, Robert. Vibration Measurement Instrumentation. In: Cyril M. HARRIS a Allan G. PIERSON, eds. *HARRIS' SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK*. 5th ed. New York: MCGRAW-HILL, 2002, s. 463-504. ISBN 0-07-137081-1
- [9] Which measurements should I take?. In: *Adash: Vibration analyzers and condition monitoring* [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://adash.com/vibration-diagnostics/which-measurements-should-take/>
- [10] *Vibration Diagnostic Guide*. San Diego: SKF Reliability Systems, 31 s. [online]. [b.r.]. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/edge/P14453/public/Research/SKF%20VibrationGuide.pdf>
- [11] *Vibration Analysis Dictionary*. Mobius Institute. [online]. [b.r.]. Dostupné z: <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=2002>
- [12] DOGUER, Tahsin a Jens STRACKELJAN. *Vibration Analysis using Time Domain Methods for the Detection of small Roller Bearing Defects* [online]. Vienna, Austria, 2009, 12 s. [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: http://www15.ovgu.de/ifme/1-dynamik/quellen/SIRM_Paper16.pdf

- [13] HANLY, Steve. Vibration Analysis: FFT, PSD, and Spectrogram Basics. In: *ENDAQ Blog* [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://blog.endaq.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram>
- [14] YAMAMOTO, Guilherme Kenji, Cesar DA COSTA a João Sinohara DA SILVA SOUSA. A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in rotating machinery. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2016, 4, 8-18 [cit. 2020-06-03]. <https://doi.org/10.1016/j.csmsp.2016.07.001>. ISSN 23519886.
- [15] *Analysis Definitions: Unbalance*. Mobius Institute. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=10001&iVibe=1&sTitle=Analysis%20Definitions>
- [16] MONTE, Michael, Florian VERBELEN a Bram VERVISCH. *The use of orbitals and full spectra to identify misalignment* [online]. In: Springer International Publishing, 2014, 5 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1007/978-3-319-04570-2_24. ISBN 9783319007793. ISSN 2191-5644. Dostupné z: <https://biblio.ugent.be/publication/4296922>
- [17] *Analysis Definitions: Misalignment*. Mobius Institute. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=10002&iVibe=1&sTitle=Analysis%20Definitions>
- [18] *Looseness: Structural looseness*. Mobius Institute. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=8020&iVibe=1&sTitle=Looseness>
- [19] WEISSTEIN, Eric W. *Discrete Fourier Transform*. MathWorld—A Wolfram Web Resource. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-4]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/DiscreteFourierTransform.html>
- [20] WEISSTEIN, Eric W. *Fast Fourier Transform*. MathWorld—A Wolfram Web Resource. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-4]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>
- [21] *Instrument Fundamentals: Understanding FFTs and Windowing*. National Instruments, 15 s. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-4]. Dostupné z: <https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>
- [22] SCHALDENBRAND, Peter. *Window Types: Hanning, Flattop, Uniform, Tukey, and Exponential*. In: SIEMENS Simcenter [online]. 2019-8-29 [cit. 2020-6-4]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/window-types-hanning-flat-top-uniform-tukey-and-exponential>
- [23] *Direct Memory Access (DMA) FIFOs*. In: National Instruments: LabVIEW Communications System Design Suite 5.0 Manual [online]. 2020-2-27 [cit. 2020-6-4]. Dostupné z: <https://www.ni.com/documentation/en/labview-comms/latest/fpga-targets/dma-fifos/>

- [24] *How DMA Transfers Work (FPGA Module)*. In: National Instruments: LabVIEW 2018 FPGA Module Help [online]. March 2018 [cit. 2020-6-4]. Dostupné z: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371599P-01/lvfpgaconcepts/fpga_dma_how_it_works/
- [25] Audacity Team. *Audacity®* [software]. Version 2.4.1. 2020-5-21 [prístup 8. júna 2020] Dostupné z: <https://www.audacityteam.org/>
- [26] WEISSTEIN, Eric W. *Fourier Series*. MathWorld—A Wolfram Web Resource. [online]. [b.r.] [cit. 2020-6-10]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/FourierSeries.html>
- [27] HOKANSON, Jim. *TDMS Reader* [software]. Version 2.5. 2018-12-20 [prístup 10. júna 2020] Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30023-tdms-reader>
- [28] OSTREM, Julie, Jeff FIELDS. *A principles of voice production tutorial series: The Spectrograph and Spectral Analysis* [online]. In: National Center for Voice and Speech Tutorials, [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <http://www.ncvs.org/ncvs/tutorials/voiceprod/tutorial/spectral.html>
- [29] myRIO Student Embedded Device. In: *National Instruments products* [online]. [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <https://www.ni.com/en-gb/shop/select/myrio-student-embedded-device>
- [30] Primary/Secondary Signals on MXP Connectors A and B. In: *NI myRIO-1900 USER GUIDE AND SPECIFICATIONS* [online]. [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>
- [31] AliasingSines. In: Moxfyre, *wikimedia.org* [online]. 2009-4-21, [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AliasingSines.svg>
- [32] This spectrum is a textbook example of a cracked or broken tooth when two gears are meshing together. In: OVERTON, Brian, *plantservices.com* [online]. 2019-9-25, [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <https://www.plantservices.com/articles/2019/get-better-insights-from-your-vibration-data/>
- [33] Engine Alignment. In: *Mechanical Engineering* [online]. 2009-2-21, [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <http://mech-engineer.blogspot.com/2009/02/engine-alignment.html>
- [34] Signal windowing. In: *Texas Instruments Youtube channel* [online]. 2018-2-16, [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=dCeH0f4cJE0>
- [35] Data Transfer Using FIFOs. In: *National Instruments: LabVIEW Communications System Design Suite 5.0 Manual* [online]. 2020-2-27, [cit. 2020-6-10] Dostupné z: <https://www.ni.com/documentation/en/labview-comms/latest/fpga-targets/data-transfer-using-fifos/>
- [36] Butterworth filter magnitude response. In: *LabVIEW filter configuration*. [cit. 2020-6-10]

Zoznam obrázkov

3.1	myRIO [29]	5
3.2	MXP konektor [30]	5
3.3	Záznam signálu s rušením single-ended konfiguráciou [1]	6
3.4	Záznam signálu s rušením diferenciálnou konfiguráciou [1]	6
3.5	Vzorkovanie spojitého signálu	7
3.6	Dva rozdielne signály ktoré popisuje rovnaká množina vzorkov [31]	8
3.7	Kvantovanie signálu	8
3.8	Ukážka front panelu s ovládacími a vizualizačnými prvkami	10
3.9	Ukážka block diagramu	10
3.10	Signál v časovej doméne, jeho FFT a charakteristické parametre	11
4.1	Vibrácie zdravého ložiska (vľavo) a poškodeného ložiska (vpravo) [12]	13
4.2	Signál v časovej doméne (vľavo) a signál vo frekvencnej doméne (vpravo) [13]	13
4.3	Ukážkový príklad zlomeného zubu keď 2 ozubené kolesá zapadajú do seba [32]	14
4.4	Paralelné (vľavo) a uhlové (vpravo) vychýlenie [33]	14
4.5	Nespojitost zaznamenaného signálu pri FFT analýze [34]	16
4.6	Aplikácia okna na predošlú funkciu [34]	16
5.1	Bloková schéma prenosu dát	17
5.2	Elementy presúvajúce sa cez FIFO [35]	18
5.3	Plošný spoj využívaný na ovládanie aplikácie	19
5.4	Bloková schéma aplikácie	19
5.5	Analýza zaznamenaného signálu v časovej doméne	20
5.6	Analýza zaznamenaného signálu vo frekvenčnej doméne	21
5.7	Frekvenčné odozvy rôznych typov Butterworth filtra [36]	22
5.8	Odfiltrovanie vysokofrekvenčnej časti signálu	22
5.9	Vývoj RMS hodnoty signálu	22
5.10	Bloková schéma aplikácie	23
5.11	Front panel aplikácie	24
6.1	Generovanie signálu v programe Audacity	27
6.2	Zaznamenaný signál v časovej a frekvenčnej doméne	27
6.3	Priblíženie vrcholov z obrázku 6.2b	28
6.4	Zaznamenaný signál v časovej a frekvenčnej doméne	28
6.5	Postupná kombinácia sínusoviek nepárnych harmonických frekvencií	29
6.6	Dva rozdielne signály sa javia ako rovnaké kvôli nesplneniu Nyquistovho kritéria	30
6.7	Spektrogram zaznamenaného signálu	31
6.8	Spektrogram priblížený na DTMF tóny	31
6.9	Spektrogram hovorených samohlások [28]	32
6.10	Spektrogram samohlások hovorených autorom tejto práce	33

Zoznam použitých skratiek a symbolov

Δt	[s] Čas medzi jednotlivými vzorkami
f_s	[Hz] Vzorkovacia frekvencia
f_{max}	[Hz] Maximálna frekvencia signálu
E_q	[-] Kvantizačná chyba
C	[-] Crest factor
Δf	[Hz] Frekvenčné riadkovanie
N	[-] Počet vzoriek
ΔU	[V] Minimálna napäťová zmena ktorú AD prevodník zaznamená
E	[V] Maximálny merací rozsah
B	[-] Optimálna veľkosť bloku
n	[-] Poradie hodnoty ktorá sa zobrazí na grafe